UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

FACULTE DES SCIENCES

LABORATOIRE DE GEOLOGIE

Thèses pour obtenir le diplôme d'Ingénieur-Docteur

PREMIÈRE THÈSE

LE MASSIF DE CARPIAGNE AU SUD DE LA BARASSE

Etude de géologie appliquée à l'établissement d'un bassin de décantation de boues industrielles

DEUXIÈME THÈSE

LA DETERMINATION DU COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ DES ROCHES PAR LES MESURES DANS LES SONDAGES

(Essais Lefranc)

Soutenues le 30 Novembre 1959

PAR

PIERRE MARTIN

Ingénieur E.N.S. de Géologie
Licencié ès-Sciences

devant la Commission d'Examen :

M. GEORGES CORROY	*Président*
Mme SUZANNE TAXY-FABRE MM. CLAUDE GOUVERNET ROGER MULLER-FEUGA	*Examinateurs*

Imprimerie M. LECONTE
98, Cours Lieutaud, 98
MARSEILLE
— 1959 —

LA DETERMINATION

du coefficient de perméabilité des roches par les mesures dans les sondages

(Essais Lefranc)

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

FACULTE DES SCIENCES

LABORATOIRE DE GEOLOGIE

Thèses pour obtenir le diplôme d'Ingénieur-Docteur

PREMIÈRE THÈSE

LE MASSIF DE CARPIAGNE AU SUD DE LA BARASSE

Etude de géologie appliquée à l'établissement d'un bassin de décantation de boues industrielles

DEUXIÈME THÈSE

LA DÉTERMINATION DU COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ DES ROCHES PAR LES MESURES DANS LES SONDAGES

(Essais Lefranc)

Soutenues le 30 Novembre 1959

PAR

PIERRE MARTIN

Ingénieur E.N.S. de Géologie
Licencié ès-Sciences

devant la Commission d'Examen :

M. GEORGES CORROY	*Président*
Mme SUZANNE TAXY-FABRE	*Examinateurs*
MM. CLAUDE GOUVERNET	
ROGER MULLER-FEUGA	

Imprimerie M. LECONTE
98, Cours Lieutaud, 98
MARSEILLE
— 1959 —

Monsieur le Professeur G. CORROY *voudra bien trouver ici l'expression de la respectueuse reconnaissance de l'un de ses élèves.*

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur R. MULLER-FEUGA, *qui m'enseigna l'hydraulique souterraine à l'E.N.S. de Géologie et conseilla cette étude.*

Je remercie Madame S. TAXY-FABRE *et* Monsieur C. GOUVERNET *d'avoir bien voulu accorder leur bienveillante attention à la lecture de ce mémoire.*

La majeure partie de notre documentation est tirée des archives du Bureau d'Etudes REY, à Aix-en-Provence, qui, depuis 1949, a exécuté, entre autres, des centaines de sondages hydrogéologiques, au cours desquels furent réalisés des milliers d'essais de perméabilité.

Ces sondages entraient dans le cadre de campagnes de reconnaissance entreprises par le Génie rural (aménagement agricole de la Laye), les Ponts et Chaussées maritimes (nouvelles formes de radoub du port de Marseille), diverses « Régions d'équipement hydraulique » d'Electricité de France (aménagements hydroélectriques sur le Drac, la Durance, la Garonne, les Gaves, etc.) et diverses sociétés privées (recherches d'eau).

Je remercie Monsieur REY, ainsi que mes camarades du Bureau d'Etudes REY, de l'aide qu'ils ont accordée à la mise au point de ce mémoire.

P. M.
Novembre 1959.

SOMMAIRE

1. Introduction 17

2. Généralités 19

21. Principe de la méthode 19
22. Les coefficients de forme 20
23. Principe de la détermination 22
24. Validité des résultats 23

3. Pratique des essais de perméabilité 25

31. Le sondage d'étude hydrogéologique 25
32. Le matériel d'essai 27
33. Préparation de la surface de perméabilité 30
34. Exécution d'un essai de perméabilité 33
341. Choix des variables de l'essai 33
3411. Dimensions de la lanterne 34
3412. Mode d'exécution de l'essai 35
3413. Origine des mesures de longueurs 36
342. Opérations de mesures 36
3421. Essais à niveaux constants 37
3422. Essais à niveau variable 39
3423. Essais mixtes 40
343. Dépouillement des résultats 40
3431. Essais à niveaux constants 40
3432. Essais à niveau variable 41
3433. Essais mixtes 41
3434. Construction de la courbe caractéristique 45
3435. Calcul du coefficient de perméabilité.. 45

4. Précision des résultats des essais de perméabilité... 47

41. Précision des mesures 47
42. Erreur systématique 49
43. Imprécision résultant de la forme de la lanterne. 50

44. Imprécision résultant de phénomènes parasites.. 50
441. Phénomènes parasites décelables 50
442. Phénomènes parasites indécelables 51
45. Conclusions 51
46. Comparaison de résultats obtenus par la méthode Lefranc et par celle de pompage dans un puits... 52

5. Comparaison de divers types d'essais. — Rayon d'action d'un essai 55

51. Essais réalisés à niveaux constants et à niveau variable 55
52. Essais exécutés par charge et par décharge de la nappe 56
53. Essai réalisé au moyen d'une lanterne de grandes dimensions 57
54. Rayon d'action d'un essai 58

6. Etude de quelques phénomènes parasites 61

61. Stabilité du niveau d'eau pendant un essai à niveaux constants 61
62. Régime d'écoulement. Charge limite de turbulence 62
621. Calcul de la charge limite correspondant au seuil de turbulence 62
6211. Formule du gradient de Sichard 62
6212. Nombre de Reynolds 63
622. Détermination expérimentale de la charge limite 64
63. Création de renards dans les terrains meubles.... 66
64. Variations du niveau de base de l'essai 67
641. Variation du niveau de la nappe 68
642. Variation artificielle du niveau de base..... 69
65. Accidents survenant à la lanterne 71
651. Colmatage de la surface de perméabilité.... 71
652. Décolmatage de la surface de perméabilité.. 72
653. Ensablement partiel de la lanterne 73

7. Applications particulières de la méthode Lefranc... 75

71. Détermination sur lanterne haute du coefficient de perméabilité d'une roche en couche mince.... 75

72. Détermination du coefficient de perméabilité des roches non aquifères 76
721. Principe de la méthode 77
722. Préparation de la lanterne 77
723. Pratique de la méthode 78
724. Dépouillement d'un essai complet 79
725. Validité des essais. Conclusions 80
73. Détermination de la perméabilité équivalente d'une roche fissurée 81
74. Détermination des perméabilités horizontale et verticale d'une roche 83
741. Détermination dans les roches homogènes.. 84
7411. Formules de Schneebeli 84
7412. Principe de la méthode 85
7413. Abaques pour déterminer le rapport k_H/k_V 85
7474. Pratique de la méthode 86
74141. Déroulement des opérations... 86
74142. Les essais 86
74143. Incidents techniques 88
7415. Dépouillement des résultats des mesures 88
74151. Essais inexploitables 88
74152. Essais exploitables 89
7416. Conclusions 89
742. Détermination des perméabilités principales d'une roche hétérogène 90
75. Détermination de la puissance d'une nappe..... 91

8. Conclusion 93

9. Documents consultés 95

TABLE DES FIGURES

Chaque figure est repérée par le numéro du paragraphe auquel elle appartient.

La page à laquelle elle se trouve est indiquée en regard de son titre.

21. Essai de perméabilité. Schéma de principe 19
22. Position de la lanterne par rapport aux limites de la nappe 22
24. Validité des résultats d'un essai 23
32. Fiche de chantier 29
3413. Origine des mesures de longueurs 37
3421. Essais à niveaux constants. Disposition du matériel 38
34. β) Extraits de fiche de chantier (B. E. Rey) 42
34. γ) Compte rendu d'essai (B. E. Rey) 43
34. α) Exécution et dépouillement des essais de perméabilité 44
51. Essai à niveaux constants et à niveau variable 56
52. Essai par charge et décharge de la nappe 57
53. Essai réalisé sur une lanterne de grandes dimensions 58
54. Rayon d'action d'un essai (Schneebeli) 59
622. Détermination expérimentale de la charge limite correspondant au seuil de turbulence 65
63. Courbes caractéristiques d'essais affectés par des renards 67
64. Variation continue du niveau de base de l'essai... 68
642. Variation brusque du niveau de base de l'essai... 70
651. Colmatage de la surface de perméabilité 71
652. Décolmatage de la surface de perméabilité 72
653. Ensablement partiel de la lanterne 73

71. Détermination du coefficient de perméabilité d'une roche en couche mince 76
724. Essai de perméabilité en terrain sec 80
73. Détermination de la perméabilité équivalente d'une roche fissurée 83
7413. Abaques pour la détermination du rapport k_H/k_V .. 87

TABLE DES SYMBOLES

a, b, c, e, z = longueurs.

R, r = rayons.

Φ, d = diamètres.

H = hauteurs.

h = profondeurs de niveaux d'eau.

Δh = différences de niveaux d'eau, charges.

d_{10} = diamètre des grains les plus fins d'une roche meuble, dont l'ensemble constitue 10 % du poids total de l'échantillon analysé.

f = coefficient de forme d'une lanterne [L].

S = surfaces.

t = temps.

V = vitesses.

k = coefficient de perméabilité $[LT^{-1}]$.

k_H = coefficient de perméabilité horizontale.

k_v = coefficient de perméabilité verticale.

P = puissance d'une nappe $[L^2T^{-1}]$.

Q, q = débits.

p = pressions.

η = viscosités.

ϱ = masses spécifiques.

i = gradients hydrauliques $(\Delta h/a)$.

R_e = nombre de Reynolds.

$\text{Log}\,(x)$ = logarithme népérien de x.

$\varphi\,(x)$ = fonction de x.

$\Sigma_1^n\,(x) = x_1 + x_2 + x_3 \ldots + x_n$.

$a > b$ = a plus grand que b.

$a < b$ = a plus petit que b.

$a \backsim b$ = a analogue à b.

1. - INTRODUCTION

L'étude et la réalisation de la plupart des projets de génie civil (aménagements hydroélectriques, portuaires, agricoles ; fondations de bâtiments et d'ouvrages d'art ; adductions d'eau) posent des problèmes d'hydraulique souterraine. Leur résolution implique, entre autres connaissances, celle du coefficient de perméabilité de certaines roches.

De nombreuses méthodes de détermination permettent d'atteindre ce coefficient.

Parmi celles-ci, nous allons en étudier une qui, bien que très utilisée actuellement, est peu développée dans la littérature spécialisée.

On peut, en appliquant cette méthode imaginée par LEFRANC, mesurer le coefficient de perméabilité des roches poreuses au cours de leur traversée par un sondage de reconnaissance.

La mise en œuvre de son appareil est simple, sa pratique est peu onéreuse et elle permet d'effectuer des mesures autour d'un point quelconque de la roche étudiée. Longtemps difficile à interpréter, elle ne permettait d'atteindre qu'un ordre de grandeur grossier de la valeur du coefficient.

Son application systématique lors de nombreuses campagnes d'études hydroélectriques, a incité certains spécialistes d'hydraulique souterraine (CAMBEFORT, MULLER-FEUGA, RUBY, SCHNEEBELI, etc.) à en développer la théorie.

Ainsi, les résultats qu'elle fournit sont maintenant tout à fait comparables à ceux que fournissent les autres méthodes comme, par exemple, celles des effets de puits à puits, plus classiques, qui ont la faveur des auteurs et des praticiens.

2. - GÉNÉRALITÉS

Le but de l'étude que nous présentons ici est essentiellement pratique. Aussi, nous en limiterons l'aspect théorique aux quelques paragraphes qui vont suivre.

21. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

LEFRANC a montré que si l'on crée, à l'intérieur d'un massif de roches poreuses, perméables et aquifères, un vide de forme quelconque mais invariable (lanterne), relié à la surface du sol par un tube dans lequel on pompe ou injecte de l'eau (fig. 21), le débit Q à travers la surface de cette lanterne est proportionnel :

— au coefficient de perméabilité k de la roche ;
— à la surcharge (ou la décharge) Δh de la nappe, créée par l'opération ;
— à un coefficient f, appelé coefficient de forme, dépendant de la position et de la forme de la lanterne.

On a :

$$Q = k \cdot \Delta h \cdot f \qquad (21)$$

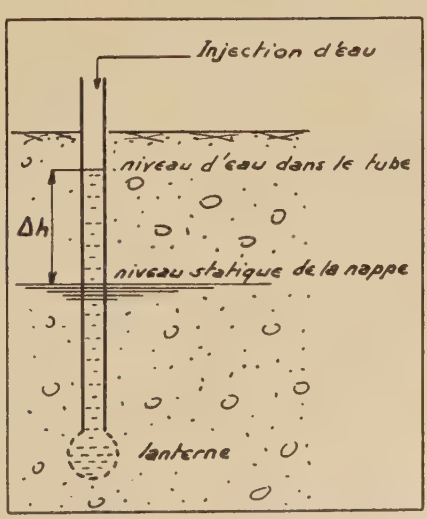


FIG. 21

Essai de perméabilité
Schéma de principe

Quand on connaît f, cette relation permet d'atteindre k grâce à des mesures de débit et de niveaux d'eau.

Ces mesures ne présentent aucune espèce de difficulté et c'est celle de la détermination du coefficient de forme de la lanterne qui a longtemps empêché les praticiens d'utiliser systématiquement cette méthode.

22. LES COEFFICIENTS DE FORME

Lefranc avait pu seulement calculer le coefficient de forme d'une lanterne sphérique.

La valeur de celui-ci est :

$$f = 4 \cdot \pi \cdot r \qquad (22, a)$$

où r est le rayon de la sphère.

Plusieurs auteurs essayèrent ensuite de calculer, par intégration, ce coefficient pour des lanternes de formes diverses. Leurs formules, en général compliquées, introduisaient des hypothèses restrictives rarement respectées dans la pratique comme, par exemple, celle qui impliquait que le fond de la lanterne atteigne une roche imperméable.

D'autres, serrant de plus près le problème, établirent empiriquement, par analogie avec des phénomènes magnétiques ou électrostatiques, les coefficients de forme des lanternes les plus usuelles (sphère, cylindre, etc.).

Schneebeli a récemment exposé une synthèse théorique qui permet de les obtenir mathématiquement.

Cet auteur assimile la lanterne réelle, créée dans le terrain, à une surface de forme géométrique simple : disque, sphère ou cylindre. Elle est alors caractérisée par deux dimensions : Φ, son diamètre et H, sa hauteur, ou par le rapport H/Φ de celles-ci.

Par des calculs d'analyse dimentionnelle, il a montré que :

— le coefficient de perméabilité de la roche k,

— le débit à travers la lanterne Q,

— la surcharge (ou la décharge) de la nappe Δh,

— le diamètre Φ et la hauteur H de la lanterne

sont liés par une relation du type :

$$\frac{k \cdot \Delta h \cdot \Phi}{Q} = \varphi\left(\frac{H}{\Phi}\right) \qquad (22, b)$$

SCHNEEBELI a déterminé la fonction φ (H/Φ) grâce à un raisonnement utilisant l'analogie formelle qui existe entre certaines formules de l'électrostatique et de l'hydraulique souterraine. Il a établi que :

— si $H/\Phi = 0$ (fond) $\varphi = 1/\pi$ (22, *c*)

— si $H/\Phi \leqq 2$ (lant. basse) $\varphi = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{H/\Phi + 1/4}}$ (22, *d*)

— si $H/\Phi > 2$ (lant. haute) $\varphi = \frac{\Phi}{2.\pi.H} \cdot \log \frac{2.H}{\Phi}$ (22, *e*)

Notons que la valeur de φ pour $H = 0$ $(1/\pi)$ est égale à celle que donne la formule (22, *d*) dans laquelle on fait $H = 0$ et que si $H/\Phi = 2$, les formules (22, *d*) et (22, *e*) conduisent au même résultat.

On peut donc utiliser la formule (22, *b*) sous l'une des formes suivantes :

— $H/\Phi \leqq 2$ $k = \frac{Q}{2.\pi.\Delta h.\Phi.\sqrt{H/\Phi + 1/4}}$ (22, *f*)

— $H/\Phi > 2$ $k = \frac{Q}{2.\pi.H.\Delta h} \cdot \log \frac{2.H}{\Phi}$ (22, *g*)

Ces formules ne sont valables que si la lanterne est loin de la surface de la nappe et de celle du substratum étanche.

Si l'on veut tenir compte de l'influence de ces deux surfaces, on doit ajouter aux formules (22, *c*), (22, *d*) et (22, *e*) les quantités suivantes :

— si la lanterne est proche de la surface de la nappe,

$$- \frac{\Phi}{8.\pi.z} \qquad (22, h)$$

— si la lanterne est proche du fond imperméable,

$$+ \frac{\Phi}{8.\pi.z'} \qquad (22, i)$$

dans lesquelles z et z' sont les distances du centre de la lanterne à la surface de la nappe et à celle de l'imperméable (fig. 22).

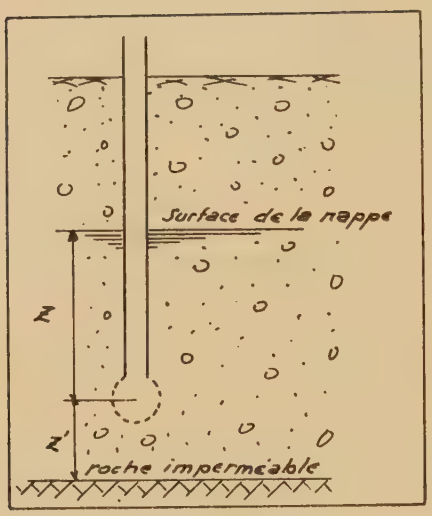


FIG. 22

Position de la lanterne par rapport aux limites de la nappe

On a, par exemple, dans le cas d'une lanterne basse proche du fond de la surface :

$$\varphi = \frac{1}{2.\pi\ \sqrt{H/\phi + 1/4}} - \frac{\phi}{8.\pi.3}$$

23. PRINCIPE DE LA DÉTERMINATION

L'ensemble des opérations nécessaires à la détermination du coefficient de perméabilité est appelé « essai de perméabilité ». Un tel essai peut être réalisé de plusieurs façons.

On peut pratiquer un pompage ou une injection à débit constant dans le tube reliant la lanterne à la surface du sol.

On note le niveau d'eau (h_0) dans le tube avant l'essai (nappe au repos) et le niveau (h) pendant celui-ci. On obtient ainsi la charge (Δh) — ou la décharge — de la nappe, due à l'opération.

Un tel essai est dit « à niveaux constants ». Il se pratique dans les terrains très perméables.

On peut aussi charger ou décharger la nappe avant l'essai en vidant ou remplissant le tube ; on observe ensuite les variations en fonction du temps, du niveau d'eau dans celui-ci.

Un tel essai est dit « à niveau variable ». Il se pratique dans un terrain peu perméable.

Quelquefois, on réalise un essai procédant à la fois des deux types précédents : on observe les variations du niveau d'eau

dans le tube pendant une injection ou un pompage à débit constant insuffisant ou trop fort pour permettre la stabilisation du niveau d'eau dans le tube.

Un tel essai est dit « essai mixte ». La pratique en est assez rare.

24. VALIDITÉ DES RÉSULTATS

Le coefficient de perméabilité d'une roche n'est défini que si l'écoulement qui se produit dans celle-ci est régi par la loi de DARCY.

La formule (21) qui traduit cette loi quand elle est appliquée à un écoulement localisé dans une roche aquifère, montre, entre autre, que le débit de la lanterne est proportionnel à la charge (ou à la décharge) de la nappe.

On a donc un moyen de savoir si l'écoulement réalisé lors d'un essai est régi ou non par la loi de DARCY.

On fait varier le débit pompé ou injecté, et on note les variations parallèles de la charge ou de la décharge. La proportionnalité du débit et de la charge indique que l'écoulement suit bien la loi de DARCY et que les mesures prises sont valables.

La meilleure façon de s'en assurer consiste à construire la courbe $\Delta h = \varphi (Q)$ ou bien, ce qui revient au même, la courbe $h = \varphi (Q)$ que l'on appelle courbe caractéristique de l'essai (fig. 24).

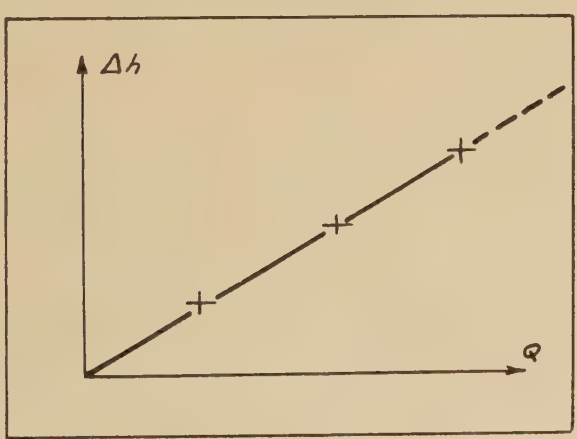


FIG. 24

Validité des résultats d'un essai

Les résultats de l'essai peuvent être considérés comme valables quand cette courbe est une droite.

3. - PRATIQUE DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

En général, les essais de perméabilité sont réalisés au cours de sondages de reconnaissance en subsurface.

Les opérations de mesures sur le chantier sont exécutées par l'équipe de sondage, sous la surveillance inopinée de l'ingénieur. Celui-ci doit, aussi, dépouiller et exploiter les résultats des mesures.

31. LE SONDAGE D'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

Un sondage destiné à l'exécution d'essais de perméabilité doit être particulièrement soigné, car de sa bonne réalisation dépend, en grande partie, la qualité des mesures prises.

Les buts du sondage sont multiples.

La reconnaissance des terrains traversés y est possible grâce à des carottages qui permettent de déterminer la nature, l'épaisseur et la position des formations géologiques.

On peut y observer, en cours de forage, le niveau piézométrique de la nappe à la profondeur atteinte.

On peut y réaliser, en plus ou moins grand nombre, des essais de perméabilité.

Il est enfin possible, à la fin du sondage, d'équiper celui-ci de piézomètre et de limnigraphe.

En règle générale, le sondage est vertical ou très peu incliné. Il est exécuté à percussion dans les terrains boulants et tendres et à rotation dans les terrains cohésifs et durs.

Les diamètres de forage couramment utilisés pour ces travaux sont 114 mm à percussion et 86 mm à rotation.

Ceux-ci sont pratiques mais, bien entendu, leur emploi n'est nullement impératif. Plus petits, les tubes sont très encombrés par les appareils, ce qui rend difficiles les mesures ; plus grands, ils peuvent conduire à des débits importants.

La méthode à percussion consiste à enfoncer dans le terrain vierge un tubage muni, à sa base, d'une trousse coupante extérieure (sabot), en le battant au moyen d'un mouton.

Quand la profondeur à laquelle on doit faire l'essai est atteinte par le sabot, on vide le tubage des terrains qui y ont pénétré pendant le fonçage. Cette opération peut se faire à l'aide d'un carottier à percussion, si l'on veut un échantillon du terrain, ou avec un trépan à injection d'eau claire. Il est bon de ne jamais utiliser pour cela une curette car on ne peut pas, avec cet instrument, obtenir un échantillon représentatif de la roche et parce qu'il désorganise entièrement les terrains qu'il attaque, ce qui est néfaste à la qualité des essais de perméabilité.

Quand l'outil de curage débouche sous le sabot, on peut réaliser l'essai puis poursuivre le sondage.

La méthode à rotation consiste à découper dans le terrain une carotte cylindrique que l'on remonte au jour pour être gardée comme échantillon. L'outil est une fraise, ou couronne, équipée d'un bord d'attaque garni de métal dur ou de diamants.

En général, le sondage n'est pas tubé : il est donc possible à tout moment d'y effectuer un essai de perméabilité.

Dans la plupart des cas, un sondage de reconnaissance hydrogéologique débute à percussion dans les terrains de couvertures (éboulis et alluvions) et s'achève à rotation dans le rocher (roches en place du bed-rock ou du versant).

La réalisation d'un tel sondage suppose l'observation d'un certain nombre de règles de travail qui, dans certains cas, peuvent sensiblement la compliquer.

Tout d'abord, on ne peut pas utiliser de boue de forage dans la zone d'essai : la formation d'un cake pratiquement étanche le long des parois du sondage empêcherait tout échange d'eau entre la nappe et le trou.

Quand les terrains traversés sont boulants, il est nécessaire de tuber à l'avancement.

Si le sondage doit traverser une grande épaisseur de tels terrains, cette méthode risque d'être très onéreuse (télescopages nombreux) ; on peut alors utiliser la boue pour forer les zones dans lesquelles on ne doit pas faire d'essai. Dans ces conditions, il est nécessaire, quand on veut en faire un, d'arrêter le forage à la boue cinq à six mètres au-dessus de la zone choisie, de tuber, de foncer le tube de deux mètres environ, de laver abondamment celui-ci afin d'en chasser toute trace de boue et de poursuivre le fonçage en tubant à l'avancement jusqu'à la profondeur d'essai.

On perd ainsi un diamètre à chacune de ces opérations. Cela limite le nombre d'essais que l'on peut réaliser dans un même sondage.

D'autre part, on doit toujours enfoncer le tubage dans le terrain vierge et le vider ensuite en évitant que l'outil de curage travaille nettement sous le sabot. Ainsi, les terrains adhèrent fortement au tubage et leur contact avec celui-ci est pratiquement étanche : les possibilités de cheminements d'eau le long du tubage sont limitées au maximum.

Enfin, quand on arrête le fonçage à percussion pour poursuivre à rotation, le sabot du tubage doit être suffisamment planté dans le rocher pour que l'ancrage en soit étanche et empêche toute perte d'eau vers les terrains susjacents. Si l'on a des doutes sur ce point, il est bon de cimenter le pied du tubage avant de poursuivre le sondage.

32. LE MATÉRIEL D'ESSAI

Le matériel nécessaire à l'exécution d'un essai de perméabilité doit répondre à des conditions très particulières d'emploi.

Faisant partie de l'ensemble du matériel d'un chantier de sondage, il doit être léger, peu encombrant et robuste. Il y a toujours intérêt à le réduire au maximum en essayant, le plus possible, de tirer parti des outils nécessaires à l'exécution du sondage.

Sa mise en œuvre et son utilisation doivent être d'une grande facilité car il est manipulé par les ouvriers de l'équipe de sondage.

C'est un matériel de mesure ; il doit donc être précis, juste et fidèle et il faut toujours veiller à ce qu'il soit en parfait état de fonctionnement.

Une partie de ce matériel ne sert qu'au conditionnement de l'essai. Il s'agit surtout du groupe de pompage nécessaire aux essais à niveaux constants ; on utilise celui qui sert à l'alimentation du trépan d'injection au cours du fonçage à percussion.

La pompe est du type centrifuge à amorçage automatique. Entraînée par un moteur thermique de 4 ch qui doit être muni d'un régulateur efficace, ses possibilités (30 m de refoulement ou 30 m^3/h) sont très largement suffisantes pour la réalisation d'essais qui nécessitent de faibles débits (2 m^3/h au maximum) et des refoulements négligeables.

Une vanne à opercule, posée sur le refoulement, permet d'en régler le débit avec précision.

Sur le chantier, où les montages de tuyauteries sont som-

maires, un tel groupe ne peut pas pomper à plus de 6 m de profondeur.

La tuyauterie descendue dans le sondage pour relier la pompe à la nappe peut être constituée par le train de tiges du trépan (tube 40-49).

Pour les essais par aspiration, il est bon de disposer, en pied, une crépine à clapet.

Bien qu'il ne soit pas absolument nécessaire à l'essai, il est commode de pouvoir utiliser le chevalement de sondage pour manœuvrer la règle de mesures.

La décharge d'un sondage assez profond en terrains peu perméables, peut se faire à l'aide d'une soupape.

S'il n'existe pas de point d'eau utilisable à proximité du chantier, l'eau nécessaire à un essai par injection doit être transportée en citerne. Celle-ci doit contenir environ 500 l afin d'éviter les voyages au cours d'un même essai.

Le reste du matériel, beaucoup moins encombrant que celui que nous venons de décrire, est constitué par les appareils de mesures proprement dits : sonde, double-mètre, compteur à eau, récipients étalonnés et chronomètre.

Si, au cours de l'essai, le niveau d'eau reste assez voisin de la surface du sol, les mesures qui le concernent peuvent être prises à l'aide d'une chaîne graduée en mètres, terminée par une règle de 2 à 3 m graduée en décimètres.

Si le niveau est profond, il est plus pratique d'utiliser une sonde à contact électrique. On doit se servir avec précaution de cet appareil, quand la règle ne peut pas convenir aux mesures.

Le tubage et le train de tiges, soigneusement mesurés, servent de jauge pour déterminer les caractéristiques (hauteur et diamètre) de la lanterne.

Un double-mètre pliant, gradué en millimètres, permet de préciser les mesures et d'étalonner ces divers appareils.

On détermine les débits par des mesures de volumes et de temps.

Pour les essais à niveaux constants, on mesure les volumes avec un compteur à eau ou un récipient étalonné.

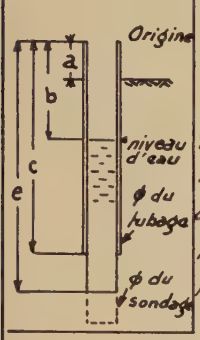
Le compteur à eau est du type à palettes, analogue à ceux que l'on branche sur les réseaux de distribution d'eau. Ces compteurs sont gradués en litres, un voyant tournant permet d'apprécier, à l'œil, la régularité de l'écoulement. En très bon

Chantier de : _____ Sondage n° _____

Essai de Perméabilité n° _____

Effectué le : _____ de ___ h. ___ à ___ h ___

par : _____ durée de l'essai : ___ h ___



Nature de l'essai : _____

ϕ tubage : _____

ϕ Sondage : _____

hauteur du tubage au dessus du sol (a) : _____

longueur totale du tubage (c) : _____

Profondeur du fond sous l'origine (e) [avant : _____ ; après : _____]

Profondeur de la nappe sous l'origine (b) [avant : _____ ; après : _____]

Réservé au dépouillement

Profondeur moyenne du fond : _____

" du tubage sous le sol : _____

Hauteur de la lanterne : _____

Rapport H/ϕ : _____

niveau moyen de la nappe : _____

Eléments de Calcul

Δh = _____ Q = _____

K = _____ m/s

temps	Profondeurs sous l'origine	débits cumulés	débits unitaires	Réservé au dépouillement	temps	Profondeurs sous l'origine	débits cumulés	débits unitaires	Réservé au dépouillement

Fig. 32. — Fiche de chantier.

état, ils tournent régulièrement à faible débit (0,5 l/mn) ; usagés, ils ne sont utilisables qu'à plus forts débits (1,5 l/mn).

On peut aussi mesurer les volumes d'eau avec des récipients de capacité connue ; celle-ci est, selon les cas, de 10, 50 ou 200 l.

On ne mesure pas directement des volumes d'eau au cours des essais à niveau variable.

Avec un compteur à eau, ou lors d'essais à niveau variable, on peut utiliser, pour mesurer le temps, une simple montre à trotteuse centrale tournant en une minute. On mesure alors le volume qui s'écoule (ou bien la variation de niveau) pendant un temps donné (généralement une minute).

Avec un récipient étalonné, on doit utiliser un chronomètre à déclenchement et arrêt commandés car il faut alors mesurer le temps qui est nécessaire au remplissage du récipient.

Nous pensons qu'il est bon de donner ici quelques indications au sujet des fiches sur lesquelles le chef d'équipe note ses observations.

Celles-ci doivent être conçues de façon à ce que l'opérateur n'oublie aucun renseignement nécessaire au dépouillement des résultats.

Chaque renseignement y est l'objet d'une rubrique dont l'appellation doit être claire afin d'éviter toute confusion ; un croquis peut, éventuellement, la préciser.

Seuls, les résultats des mesures brutes doivent y figurer et il faut, en particulier, éviter d'imposer tout calcul à l'opérateur. Ainsi, celui-ci porte sur sa fiche des chiffres ou des listes de chiffres correspondant aux mesures que lui ou ses aides effectuent ; cela réduit au minimum les risques d'erreur.

Il est bon de ménager, sur la fiche, des parties réservées au dépouillement sur lesquelles l'ingénieur peut expliciter les éléments servant au calcul du coefficient de perméabilité ; cela permet de réduire les pièces d'archives se rapportant à un même essai.

Le modèle de fiche que nous présentons (fig. 32) est utilisé depuis de nombreuses années ; il a toujours donné satisfaction.

33. PRÉPARATION DE LA SURFACE DE PERMÉABILITÉ

Avant de procéder aux mesures proprement dites, on doit préparer avec soin la surface de perméabilité ; cette opération dépend de la façon dont on exécute le sondage.

Dans les roches boulantes et tendres, forées à percussion, la préparation est particulièrement délicate et on doit lui consacrer une attention soutenue. En effet, les terrains formant les parois de la lanterne doivent être aussi peu remaniés que possible et, entre autre, ni compactés, ni désorganisés.

Le tubage est enfoncé jusqu'à la profondeur choisie pour exécuter l'essai. On le cure ensuite au carottier à percussion ou au trépan à injection d'eau.

Si l'on opère à l'aide du trépan, on poursuit le fonçage sous le sabot d'une profondeur égale à la hauteur de lanterne que l'on s'est fixée. On relève ensuite le trépan à l'intérieur du tubage et on continue l'injection d'eau jusqu'à ce que cette dernière sorte claire du sondage, indiquant que la lanterne est propre.

La plupart du temps, il est difficile de réaliser une lanterne de hauteur importante dans les terrains boulants très perméables. On ne peut, par exemple, dépasser 5 à 6 cm dans les alluvions aquifères, forées en 114 mm.

Il est bon d'arrêter le forage avant qu'il ne se produise un éboulement des parois de la lanterne, afin de ne pas désorganiser les terrains qui la constituent. Quand on constate un éboulement imprévu, on doit à nouveau enfoncer le tubage jusqu'à ce que son extrémité ait dépassé la zone éboulée, et préparer une nouvelle lanterne de plus faible hauteur que celle primitivement choisie.

Le carottier à percussion utilisé pour préparer une lanterne est différent d'un carottier d'échantillonnage. La trousse du premier est coupante vers l'extérieur alors que celle du second l'est vers l'intérieur ; ainsi, sa surface extérieure est parfaitement cylindrique et ne risque pas de glacer les terrains qui forment la paroi de la lanterne, ce qui ne manquerait pas de se produire si son extrémité était conique.

On bat cet instrument jusqu'à ce que son extrémité ait atteint la profondeur désirée, on casse la carotte à sa base en le faisant tourner et on le remonte délicatement au jour. On s'assure que toute la carotte a été prélevée puis on sonde le fond du trou pour contrôler qu'il ne s'y est pas produit d'éboulement.

On utilise le carottier à percussion dans les terrains tendres et cohésifs (sables argileux compacts, tufs, etc.). Il permet de préparer des lanternes de forme régulière dont la hauteur peut être importante.

Le trépan à injection est utilisé quand le terrain n'est pas suffisamment cohésif pour permettre le prélèvement d'une carotte. Il s'agit, en général, de roches alluvionnaires peu argileuses et très aquifères composées, entre autres, de galets plus gros que le diamètre du carottier.

Avec cet outil, on n'est pas maître de la forme de la lanterne et celle-ci est, bien souvent, très basse (5 à 6 cm).

Dans les terrains très boulants et peu perméables, il faut préparer une lanterne assez haute qui a de grandes chances de s'ébouler. On peut prévenir cet éboulement en fonçant, sous la colonne, une crépine sans fond, à trousse coupante extérieure. Celle-ci est ensuite curée au trépan à injection que l'on doit arrêter avant qu'il ait débouché sous son extrémité.

Une telle lanterne a un coefficient de forme propre qui ne peut être calculé simplement. Il est donc nécessaire d'étalonner soigneusement la crépine en l'utilisant dans un terrain de perméabilité connue. Cette opération est délicate et ses résultats sont aléatoires. Ce procédé est rarement mis en œuvre.

Nous conseillons vivement d'utiliser, à l'exclusion de tout autre, l'un de ces trois procédés de préparation de lanterne.

On évitera, par contre, le fonçage d'une crépine munie d'une pointe pleine (fiche) qui compacte fortement les terrains dans lesquels elle pénètre.

Nous déconseillons aussi l'emploi d'une curette pour préparer la lanterne. Cet outil travaille, en effet, comme un piston et désorganise le terrain en en séparant les diverses fractions granulométriques.

On utilise, dans un cas très particulier (voir paragraphe 74141) une préparation que l'on doit, autant que possible, éviter dans les autres cas.

Le tubage est descendu jusqu'à la profondeur d'essai, vidé jusqu'à son extrémité puis remonté de la hauteur de lanterne désirée. On peut ainsi éviter l'éboulement de la lanterne en jetant dans le tube, avant de le remonter, du gravier propre calibré (15-25 par exemple) qui maintiendra le terrain pendant l'essai.

Cette méthode paraît très séduisante mais nous la déconseillons car la remontée du tubage qu'elle impose altère l'étanchéité du contact de celui-ci avec le terrain. Elle accroît fortement les chances de cheminement le long du tubage, qui fausse tout à fait les mesures.

Nous avons déjà dit que la meilleure façon d'assurer un contact tubage-terrain bien étanche est de battre à l'avancement le tubage dans le terrain vierge. Il est donc absurde de compromettre celle-ci en faisant jouer le tubage par rapport au terrain.

Dans les roches dures, forées à rotation, la création d'une lanterne est chose plus aisée : l'outil de forage creuse un trou cylindrique dont les parois ne s'éboulent pratiquement jamais (si elle le faisait, on ne pourrait pas forer à rotation à l'eau claire).

Le remaniement des terrains n'est pas à craindre mais un colmatage de la surface de perméabilité, provoqué par la circulation d'eau chargée de sédiments de forage, peut toujours se produire ; aussi, il est bon d'un peu poursuivre l'injection d'eau claire après l'arrêt du travail, afin de laver la lanterne.

Si le sondage a débuté à percussion, l'ancrage dans le rocher doit être parfaitement étanche.

Ainsi, on peut effectuer, à tout moment, un essai de perméabilité dont la lanterne est constituée par toute la partie du sondage forée à rotation.

34. EXÉCUTION D'UN ESSAI DE PERMÉABILITÉ

Les opérations de mesures sur le terrain sont, le plus souvent, réalisées par l'équipe de sondage.

Celle-ci doit être bien entraînée à ce travail. Le chef sondeur doit avoir acquis, par un apprentissage auprès d'un opérateur compétent, suffisamment d'expérience pour être capable de choisir convenablement les variables d'un essai, d'apprécier la qualité des mesures prises et, au besoin, de remédier aux accidents susceptibles d'altérer celles-ci.

L'ingénieur qui dirige l'équipe dépouille les résultats de l'essai.

Il doit parfaitement connaître les habitudes et les défauts de l'opérateur afin de pouvoir en tenir compte au cours de son travail. Il est bon qu'il se rende, quelquefois, à l'improviste, sur le chantier pour assister à un essai, afin d'en contrôler l'exécution.

341. Choix des variables de l'essai

Un choix judicieux des dimensions de la lanterne et du mode d'exécution de l'essai facilite sensiblement le déroulement de l'essai.

3411. Dimensions de la lanterne.

Le choix des dimensions de la lanterne est surtout lié à la nature de la roche dans laquelle on va exécuter l'essai. Il doit, en effet, favoriser autant que possible la stabilité de la surface de perméabilité pendant la durée des mesures.

Le diamètre de la lanterne est nécessairement le même que celui du sondage. Nous verrons, plus loin, qu'il peut être quelconque, mais il est toujours choisi en fonction de l'exécution du sondage et non de celle de l'essai.

Dans un sondage en cours, on ne peut donc choisir que la hauteur de la lanterne. Pour ce faire, on doit tenir compte de la perméabilité et de la tenue mécanique de la roche.

Le débit qui traverse la surface de perméabilité doit être mesurable ; très faible dans une roche très perméable, la hauteur de lanterne doit donc être d'autant plus grande que la roche est moins perméable.

Un opérateur exercé peut apprécier la perméabilité de la roche aux pertes d'eau qui se produisent pendant la préparation de la lanterne ; la vitesse d'abaissement de l'eau dans le tubage après l'arrêt de l'injection, donne aussi de bons renseignements.

En fait, la hauteur de la lanterne est surtout imposée par la tenue mécanique de la roche.

Si la roche est meuble (sable, alluvions, etc.), cette hauteur est limitée par les éboulements qui ne manquent pas de se produire lors de la préparation. Ces éboulements sont liés à l'angle de frottement interne de la roche, au diamètre du sondage et à la façon de préparer la lanterne. Par exemple, dans les alluvions aquifères, en utilisant le trépan à injection dans un sondage de 114 mm, il est difficile d'obtenir une hauteur supérieure à 0,05 m ; on peut mieux faire avec le carottier à percussion mais l'éboulement risque alors de se produire pendant l'essai.

Quand la faible perméabilité de la roche impose une hauteur de lanterne plus grande que celle que permet le terrain, on peut utiliser une crépine étalonnée.

Si la roche est cohérente (forée, en général à rotation), la lanterne peut être aussi haute que l'on veut. On doit simplement choisir cette dimension de façon que, en cours d'essai, la surface de perméabilité ne soit jamais en partie dénoyée.

Notons qu'il y a toujours intérêt à choisir une lanterne de faible hauteur (de l'ordre de grandeur du diamètre du sondage) afin de réaliser l'essai sur un petit volume de roche. D'autre part,

une lanterne haute peut, quelquefois, être inutilisable ; quand, par exemple, la roche est assez peu perméable, le niveau d'eau risque de se stabiliser au-dessous du sabot de tubage si le débit pompé est trop important.

3412. Mode d'exécution de l'essai.

Le choix du mode d'exécution de l'essai dépend des possibilités de débit de la lanterne, c'est-à-dire des dimensions de celle-ci, de la perméabilité de la roche et de la possibilité de plus ou moins charger ou décharger la nappe.

La vitesse d'abaissement de l'eau dans le tube, après l'arrêt de l'injection, permet l'orientation de ce choix.

Si elle est supérieure à 0,5 m par minute, un essai à niveaux constants s'impose ; si elle est inférieure à cette valeur, un essai à niveau variable est préférable ; aux alentours de celle-ci, on peut exécuter un essai mixte.

Cette vitesse correspond, à peu près, au débit d'une lanterne d'une dizaine de centimètres de hauteur, creusée dans une roche de perméabilité 10^{-4} m/s.

On peut donc indiquer, en gros, pour les essais courants, les limites :

— $k > 10^{-4}$ m/s ..... essais à niveau variable.
— $k < 10^{-4}$ m/s ..... essais mixtes.
— $k \backsim 10^{-4}$ m/s ..... essais à niveaux constants.

Il est très pratique d'exécuter les essais à niveaux constants par pompage mais, bien entendu, cela n'est possible que si les niveaux d'eau correspondants aux forts débits se stabilisent à des profondeurs inférieures à la hauteur d'aspiration de la pompe (environ 6 m). On ne peut donc pas, en général, procéder de la sorte quand le niveau statique de la nappe est à plus de 4 m du sol.

De cette façon, le problème de l'approvisionnement en eau et de la qualité de celle-ci ne se pose pas, alors qu'il est primordial lors d'un essai par injection.

Par contre, il est plus simple d'exécuter les essais à niveau variable par abaissement. Il faut, pour cela, que le niveau statique de la nappe soit à plus de 2 m du niveau du sol, afin de pouvoir observer une variation de niveau notable (2 à 3 m au minimum). Quelques seaux d'eau claire jetés dans le sondage suffisent, le plus souvent, à remplir celui-ci alors qu'il est toujours malaisé de vider en partie le tubage pour créer une

décharge suffisante de la nappe et observer la remontée du niveau.

En recherche d'eau, il est toujours indiqué de réaliser des essais par pompage ou par remontée, surtout si les résultats doivent être présentés à des personnes peu au courant des questions d'hydraulique souterraine. On peut ainsi, indépendamment du calcul du coefficient de perméabilité dont la signification risque d'être mal comprise, indiquer la valeur des débits que la nappe a fourni au cours de l'essai, notion plus accessible à des gens non avertis.

Nous verrons plus loin que les essais à niveau variable sont beaucoup plus faciles et, en général, plus rapides à exécuter que les essais à niveaux constants. Ils sont, de plus, rarement affectés par les accidents qui surviennent habituellement quand le débit mis en jeu devient important. On doit donc les choisir de préférence aux essais à niveaux constants dans tous les cas où les deux méthodes peuvent être indifféremment appliquées.

3413. Origine des mesures de longueurs.

Afin d'éviter toute erreur dans la prise des mesures de longueurs, on doit fixer, pour celles-ci, une origine commune. On choisit en général, pour cela, le haut du tubage (fig. 3413).

L'opérateur doit mesurer avec soin la hauteur de l'origine au-dessus du sol afin de permettre à l'ingénieur de rapporter, lors du dépouillement, toutes les mesures de longueurs au niveau du sol.

Il est pratique, pour exécuter les essais par abaissement ou par injection, d'avoir une origine située à environ 0,5 m du niveau du sol.

La prise des mesures en est facilitée et on gagne la possibilité d'un peu de charge supplémentaire.

342. Opérations de mesures

Avant de commencer l'essai proprement dit, l'opérateur doit mesurer avec soin et noter sur la feuille d'essai (fig. 32 et 3413) :

— la hauteur de l'origine par rapport au sol (a),
— la longueur du tubage (c),
— la profondeur du fond sous l'origine (e),
— le niveau statique de la nappe sous l'origine (b).

Ces deux dernières mesures seront reprises à la fin de l'essai et leurs résultats consignés sur la feuille.

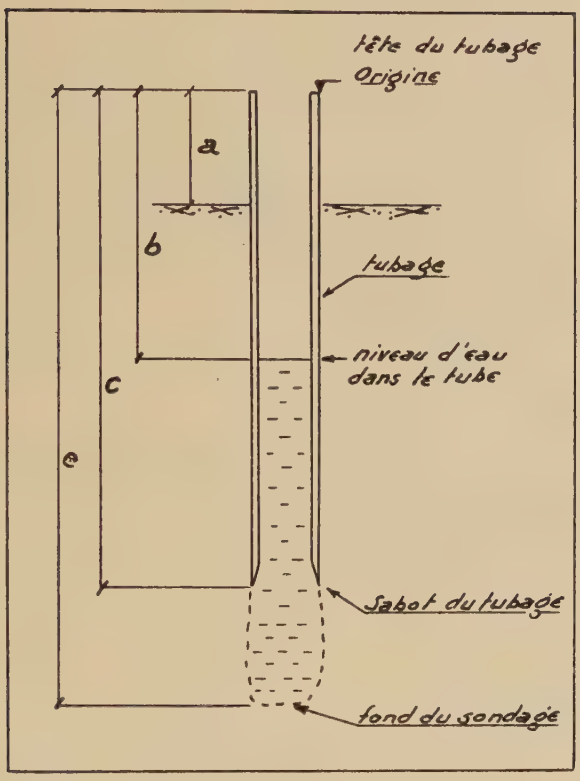


FIG. 3413

Origine des mesures de longueurs

3421. ESSAIS A NIVEAUX CONSTANTS.

Le matériel utilisé pour les essais à niveaux constants est assez important puisque, outre les appareils de mesures, on doit aussi mettre en œuvre le groupe de pompage et prévoir, selon les cas, l'évacuation loin du sondage de l'eau pompée ou bien l'approvisionnement en eau du groupe.

Si l'essai est effectué par pompage, la crépine à clapet, vissée à l'extrémité des tiges de trépan, plonge dans le sondage, un peu au-dessus de la lanterne ; le compteur à eau est branché sur le refoulement et la vanne de réglage, placée en aval du compteur de façon à ce que celui-ci soit en charge quel que soit le débit pompé (fig. 3421, 1).

Quand l'essai est réalisé par injection, l'eau utilisée doit être claire et prélevée loin du sondage. Le compteur est placé entre la pompe et le sondage, la vanne de réglage doit encore se trouver en aval du compteur ; le train de tiges du trépan sert à l'injection de l'eau dans le sondage, son extrémité doit être placée un peu au-dessus de la lanterne (fig. 3421, 2).

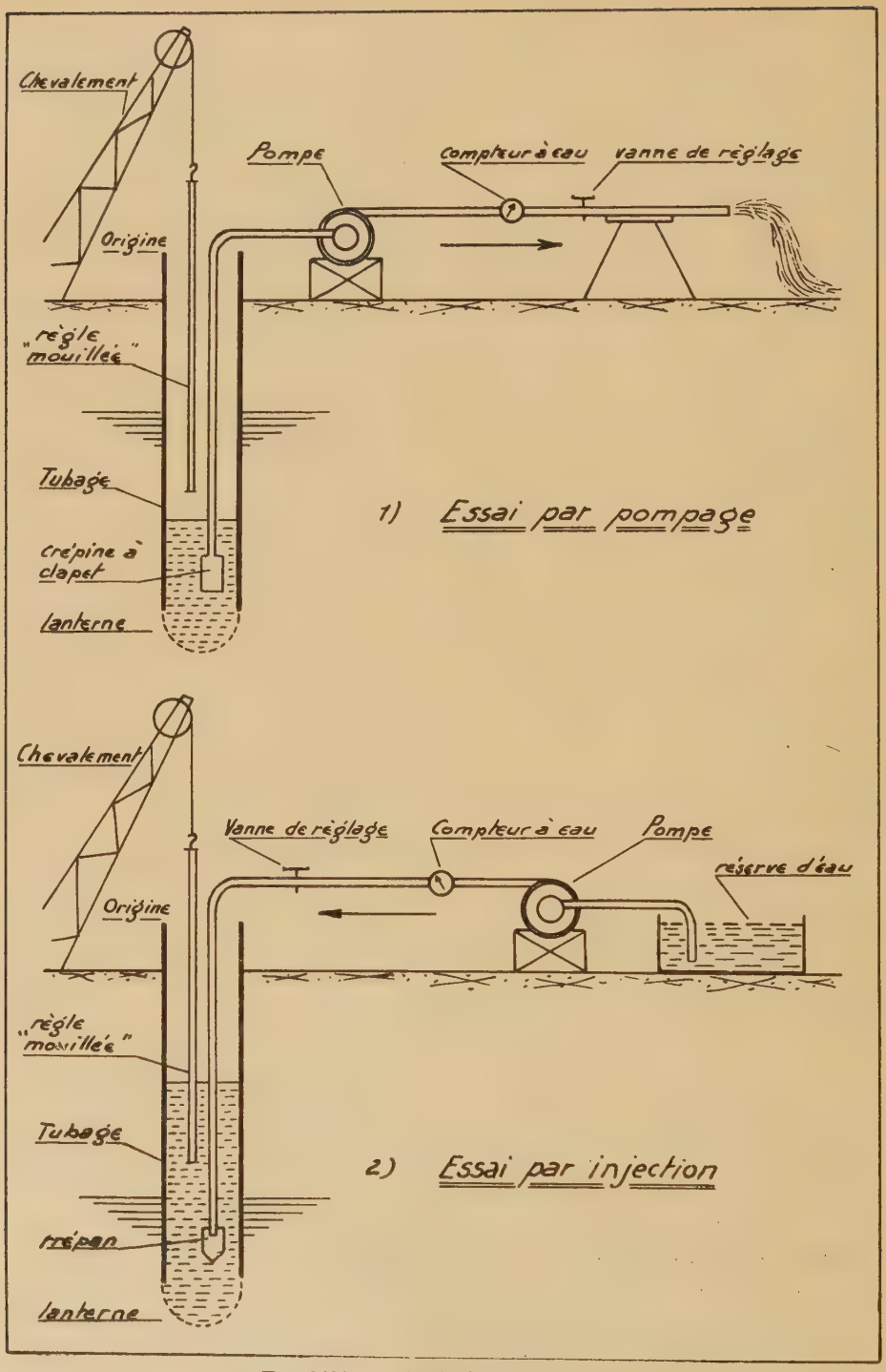


FIG. 3421. — Essais à niveaux constants.
Disposition du matériel.

Si l'on utilise un récipient étalonné pour mesurer les débits, il doit, bien entendu, être placé sur le refoulement en cas de pompage et sur l'aspiration en cas d'injection. Un chronométreur doit, de temps en temps, contrôler la constance du débit.

Pour effectuer une mesure, l'opérateur cale le débit autour d'une valeur donnée ; pour cela, la pompe doit tourner à sa vitesse de régime et le réglage se fait uniquement au moyen de la vanne ; on ne doit ensuite plus toucher à celle-ci pendant toute la durée de la mesure.

Toutes les minutes, l'opérateur note l'indication du compteur (dans la colonne « débits cumulés » de la feuille d'essai) et l'aide plonge la règle dans le sondage afin de mesurer la profondeur de l'eau.

Ces opérations doivent être répétées une dizaine de fois ; on obtient ainsi, le plus souvent, des stabilisations acceptables du niveau d'eau et du débit. Dans le cas contraire, il faut prolonger la durée des opérations au delà de dix minutes sans toutefois dépasser une vingtaine de minutes au total.

L'opérateur cale ensuite un nouveau débit et les opérations peuvent recommencer.

Il est bon de toujours commencer un essai à faible débit (1 l/mn environ) et de le terminer à fort débit (20 l/mn au maximum) ; cinq ou six débits intermédiaires doivent faire l'objet de mesures.

La durée des opérations de mesures est ainsi d'environ 1 h 30. Il faut compter à peu près 2 h 30 depuis l'arrêt du sondage pour préparer l'essai jusqu'à sa reprise.

3422. Essais a niveau variable.

Le matériel nécessaire à l'exécution d'un essai à niveau variable est réduit à la règle « mouillée » et à une montre.

Si l'essai doit être exécuté par abaissement, on remplit tout d'abord le tubage avec de l'eau claire ; s'il doit l'être par remontée, on vide en partie le sondage (4 ou 5 m au-dessous du niveau de la nappe) au moyen d'une soupape ou bien de la pompe.

Dans les deux cas, la profondeur du niveau d'eau est mesurée à intervalles réguliers, généralement toutes les minutes. L'opérateur commande en temps voulu l'immersion de la règle et note, sur la feuille d'essai, le résultat de la mesure.

Il est toujours recommandé de poursuivre les mesures jusqu'à ce que le niveau d'eau ait atteint sa profondeur de

stabilisation. Si la roche est très peu perméable, cela risque d'être fort long et l'on peut alors se contenter d'observer une variation de niveau de 4 ou 5 m sans attendre la stabilisation.

Pour un essai de ce type, les opérations de mesures durent environ une trentaine de minutes. La préparation est très rapide. Aussi, le travail de sondage est rarement arrêté plus d'une heure.

3423. Essais mixtes.

Le matériel utilisé est le même que celui d'un essai à niveaux constants.

On pompe ou injecte un débit constant tel que le niveau d'eau ne puisse pas se stabiliser.

La constance du débit est vérifiée de temps en temps, au compteur ; la profondeur du niveau d'eau est mesurée de minute en minute.

On peut choisir, avant de commencer l'essai, le sens et la vitesse de variation du niveau d'eau en jouant sur la valeur du débit pompé ou injecté.

La durée totale d'un tel essai est environ de 1 h 30.

343. Dépouillement des résultats

Le dépouillement des résultats des mesures et le calcul du coefficient de perméabilité de la roche au point essayé, sont réalisés par l'ingénieur chargé du chantier.

Celui-ci doit se préoccuper du déroulement général de l'essai : niveau de la nappe et profondeur du fond de la lanterne avant et après l'essai, observations diverses du chef sondeur, etc.

Il rapporte ensuite au sol toutes les mesures de longueurs ; puis il construit la courbe caractéristique de l'essai, l'étudie si elle est aberrante et calcule le coefficient.

La construction de la courbe caractéristique de l'essai dépend de la façon dont on a exécuté celui-ci.

3431. Essais a niveaux constants.

A chaque débit essayé lors des opérations de mesures, correspond une profondeur de niveau d'eau dans le tube.

Selon le déroulement de l'essai, la stabilisation du débit et celle du niveau ont été plus ou moins bien réalisées.

Si les stabilisations ont été correctes, on choisit sans difficulté les valeurs du débit et du niveau de l'eau qui constituent les coordonnées d'un point de la courbe

Si le débit et le niveau ont oscillé pendant la durée des mesures, on peut utiliser comme coordonnées les valeurs moyennes de ces grandeurs.

Si, au cours d'une mesure, le niveau a constamment varié dans le même sens, on exploite les résultats comme ceux d'un essai mixte (voir 3433).

Si les variations de niveau ou de débit ont été désordonnées, les mesures sont inexploitables.

Le plus souvent, à chaque débit essayé correspond un point de la courbe (fig. 34, β et 34, γ).

3432. Essais a niveau variable.

Les résultats de mesures sont présentés sous forme d'une double liste donnant la profondeur du niveau d'eau en fonction du temps.

On a, par exemple :

Niveaux	$t_1, t_2, t_3 \ldots t_n$
Temps	$h_1, h_2, h_3 \ldots h_n$

Le débit moyen pendant le temps $t_p - t_n$ est :

$$Q_{(n-p)} = S \cdot \frac{h_p \mp h_n}{t_p - t_n} \qquad (3432, a)$$

où S est la section du sondage.

On peut admettre, avec une bonne approximation, que le niveau qui correspond à ce débit est :

$$h_{(n-p)} = \frac{h_p \mp h_n}{2} \qquad (3432, b)$$

En prenant deux à deux les nombres de la liste, on obtient les coordonnées de points de la courbe caractéristique.

3433. Essais mixtes.

En plus d'une liste analogue à celle d'un essai à niveau variable, on connaît le débit constant q, mis en jeu pendant l'essai ; on a donc :

$$Q_{(n-p)} = S \cdot \frac{h_p \mp h_n}{t_p - t_n} + q \qquad (3433, a)$$

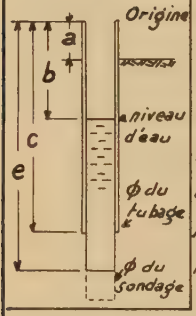
$$h_{(n-p)} = \frac{h_p \mp h_n}{2} \qquad (3432, b)$$

Chantier de : Pont d'Ars — Sondage n° 3

Essai de Perméabilité n° 8

Effectué le : 8 Septembre 1959 — de 8 h. 40 à 10 h 55

par : M. Savin — durée de l'essai : 2 h 15



Nature de l'essai : Injection

Ø tubage : 127 mm.

Ø Sondage :

hauteur du tubage au dessus du sol (a) : 0,18

longueur totale du tubage (c) : 10,18

Profondeur du fond sous l'origine (e) — avant : 10,22 ; après : 10,22

Profondeur de la nappe sous l'origine (b) — avant : 1,620 ; après : 1,617

Réservé au dépouillement

Profondeur moyenne du fond : 10,04

" du tubage sous le sol : 10,00

Hauteur de la lanterne : 0,04

Rapport H/Ø : 2/3

niveau moyen de la nappe : 1,44

Eléments de Calcul

$\Delta h = 0{,}36$ m — $Q = 10$ l/mn.

$K = 8.10^{-4}$ m/s

temps	Profondeurs sous l'origine	débits cumulés	débits unitaires	Réservé au dépouillement
0	1,600	82		
			0,8	
1	1,577	82,8		
			1,6	
2	1,555	84,4		q = 1,6
~	~	~	~	h = 1,552
			1,6	
8	1,552	93,2		h_o = 1,372
			1,6	
9	1,552	94,8		
			1,6	
10	1,552	96,4		
0	1,479	99,8		
			4,6	
1	1,447	104,4		
			5	
2	1,443	109,4		q = 4,6
~	~	~	~	h = 1,446
			4,6	
6	1,446	128		h_o = 1,266
			4,6	
7	1,446	132,6		
			4,6	
8	1,446	137,2		
0	1,322	45,6		
			8,6	
1	1,305	54,2		

temps	Profondeurs sous l'origine	débits cumulés	débits unitaires	Réservé au dépouillement
2	1,305	63		
			8,8	
~	~	~	~	q = 8,6
			8,6	h = 1,316
10	1,316	132,2		
			8,6	h_o = 1,136
11	1,316	140,8		
			8,6	
12	1,316	149,4		
0	1,207	60,8		
			11,8	
1	1,191	72,6		
			11,8	
2	1,200	84,7		q = 11,2
~	~	~	~	h = 1,208
			11,2	
9	1,208	165,4		h_o = 1,027
			11,2	
10	1,208	176,6		
0	1,103	90,8		
			14,8	
1	1,082	105,6		q = 14,4
~	~	~	~	h = 1,088
			14,4	
7	1,088	192,6		h_o = 0,908
			14,4	
8	1,088	207		

FIG. 34 β. — Extraits de fiche de chantier (B.-E. REY).

Chantier de : Pont d'Ars — Sondage n° 3

Essai de perméabilité n° 8 du 8 septembre 1959

Exécuté par injection entre 10,00 m. (tube) et 10,04 m (fond)
sur lanterne basse $H = 0{,}04$ m $\phi = 0{,}06$ m $H/\phi = 2/3$
niveau moyen de la nappe : 1,44 m.

Coordonnée des points de la courbe caractéristique de l'essai

	N	a	b	c	d	e	P
Q (l/mn)	0	1,6	4,6	8,6	11,2	14,4	10
h (m)	1,44	1,376	1,266	1,136	1,027	0,908	0,36

$$K = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{60.2\pi \cdot 0{,}06 \cdot 0{,}36 \sqrt{0{,}38 + 0{,}25}} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

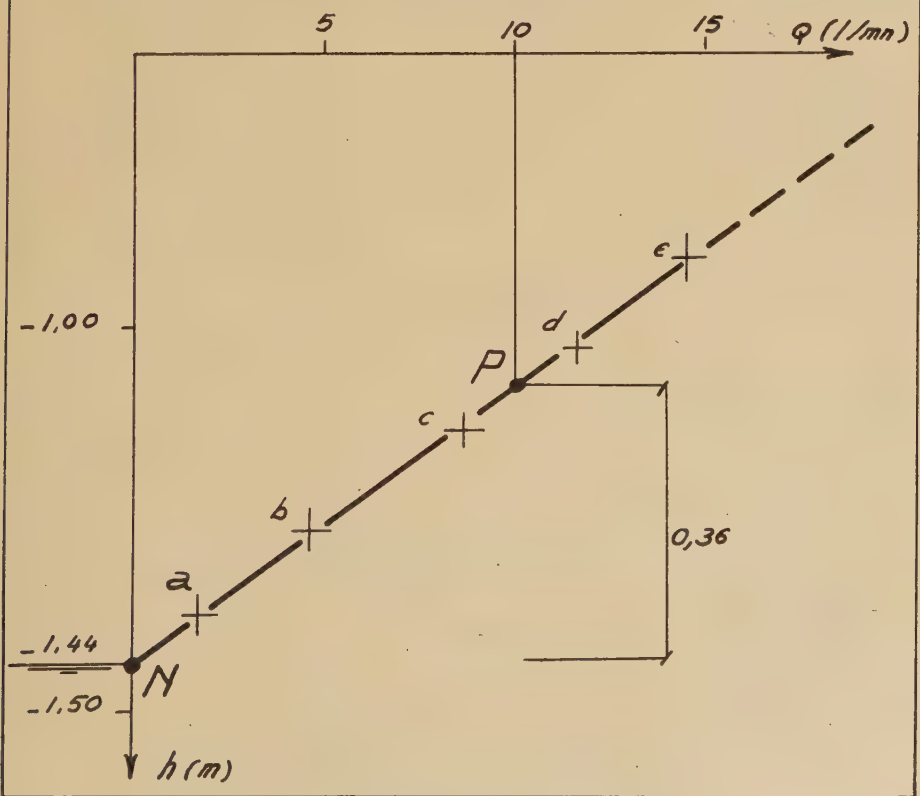


FIG. 34γ. — Compte rendu d'essai (B.-E. REY).

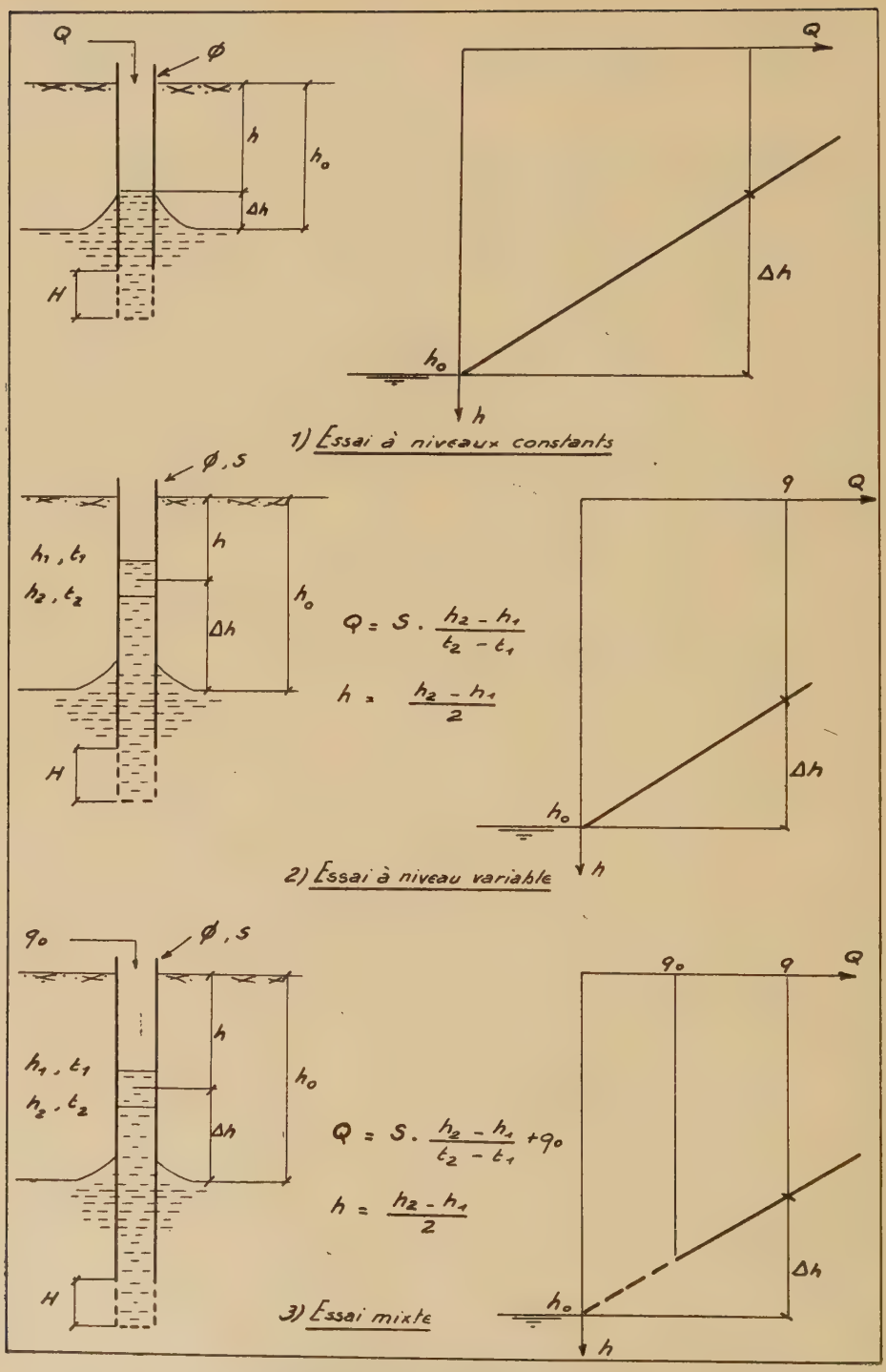


FIG. 34 α. — Exécution et dépouillement des essais de perméabilité.

On obtient encore les coordonnées de points de la courbe caractéristique en prenant deux à deux les nombres de la liste.

3434. Construction de la courbe caractéristique.

Chaque type d'essai conduit donc aux coordonnées de points de la courbe caractéristique.

Les échelles choisies pour la construction de celle-ci dépendent de l'amplitude des variations observées.

Celle des débits doit toujours être complète (de 0 au débit maximum enregistré) ; celle des profondeurs peut être limitée à sa partie utile.

Les points dont on connaît les coordonnées sont reportés sur le diagramme et on leur ajoute le point de débit nul qui correspond au niveau de la nappe au repos.

Si l'essai est correct, la dispersion de ces points autour d'une droite théorique passant par le point de débit nul est insignifiante ; on trace donc cette droite. Si l'on ne peut pas la tracer, on cherche la courbe simple qui représente le mieux l'ensemble des points obtenus.

On mesure facilement sur la droite la valeur de la charge qui correspond à une valeur choisie du débit. Ce couple de valeurs sert au calcul du coefficient de perméabilité de la roche essayée par les formules (22, *f*) ou (22, *g*).

Si l'on n'a pas pu tracer de droite, l'obtention de ce couple impose une interprétation de la courbe obtenue. Nous étudierons, dans un prochain chapitre, les plus fréquentes d'entre elles.

3435. Calcul du coefficient de perméabilité.

Rappelons que l'on utilise les formules (22, *f*) et (22, *g*) dans ce but. Dans ces formules, H et Φ sont les dimensions de la lanterne, Q et Δh ont été obtenus grâce à la courbe caractéristique de l'essai.

Nous attirons l'attention sur le fait que ces formules doivent être utilisées dans un système homogène d'unités.

On obtient ainsi k en m/s en exprimant Q en m^3/s ; Δh en m, ainsi que H et Φ.

4. - PRÉCISION DES RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

La précision des résultats fournis par les essais de perméabilité dépend de plusieurs facteurs que nous allons étudier.

41. PRÉCISION DES MESURES

Nous allons examiner, en premier lieu, l'incidence de la qualité des mesures sur la valeur du coefficient de perméabilité.

Les grandeurs mesurées au cours d'un essai sont des longueurs (diamètre et hauteur de la lanterne, niveaux d'eau), des volumes et des temps.

Le diamètre de la lanterne est, par convention, celui du sondage. La précision sur sa valeur dépend du mode de forage et des terrains traversés.

En percussion, on retient le diamètre extérieur du sabot. Celui-ci peut être connu à 1 mm près ; la précision est donc supérieure au 1/100 avec un sondage de Φ 114.

En rotation, on utilise le diamètre nominal extérieur de la couronne mais le trou de forage n'a jamais un diamètre constant et défini.

En effet, le diamètre d'une couronne neuve n'est jamais exactement égal au diamètre nominal ; si la couronne est usagée, son diamètre peut être sensiblement plus faible que le diamètre initial et elle peut être plus ou moins ovalisée. Le diamètre du trou foré est toujours supérieur à celui de la couronne ; en général régulier dans un terrain homogène, il peut être très variable dans un terrain présentant des zones de dureté inégales.

Ainsi, le diamètre d'un sondage à rotation n'est connu qu'à 5 ou 6 mm près ce qui, pour un diamètre nominal de 86 mm, représente une précision inférieure à 1/20.

On détermine la hauteur de la lanterne par la différence

de longueur entre le train de tiges de l'instrument de forage (trépan ou carottier) et le tubage ; l'erreur absolue sur cette différence peut atteindre 2 à 3 cm.

L'erreur relative sur la hauteur peut donc être considérable pour une lanterne basse ou très faible pour une lanterne haute.

Les niveaux d'eau sont mesurés au moyen de la règle « mouillée » sur laquelle on apprécie très facilement le millimètre.

A condition d'utiliser pendant toute la durée de l'essai la même origine sur la règle, les différences de niveaux sont connues à 1 mm près. Si le terrain est très perméable, l'erreur relative sur la charge peut être notoire mais, dans la majorité des cas, elle est absolument négligeable.

Si la variation de niveau dépasse l'amplitude de la règle, on doit en changer l'origine en cours de mesures. Il faut alors soigneusement mesurer les distances séparant les origines successives ; l'erreur absolue sur ces mesures peut être forte mais, comme elles correspondent à de grandes variations de niveaux, l'erreur relative sur la charge est encore négligeable.

On détermine les débits par des mesures de volumes et de temps.

On lit facilement, sur un compteur à eau à palettes, dix litres au dixième de litre près. Il est bon d'étalonner l'appareil avant sa mise en service ; sa fidélité risque de s'altérer à l'usage, il est donc indiqué de renouveler cette opération de temps en temps.

Les récipients étalonnés que l'on utilise parfois à la place des compteurs permettent des mesures dont la précision dépasse largement le centième.

Les mesures de temps sont prises au chronomètre ou bien à la montre à trotteuse centrale. On peut obtenir, sans soin particulier, la minute à une seconde près, soit une précision relative de 1/60.

Ainsi, en tenant compte des réflexes de l'opérateur, on peut apprécier l'erreur relative sur les mesures de débit à 1/50.

Les mesures de niveaux d'eau et de débits permettent la construction de la courbe caractéristique de l'essai. Le couple de valeurs de la charge et du débit choisi sur celle-ci pour calculer le coefficient de perméabilité représente un écoulement théorique suivant parfaitement la loi de Darcy. On peut donc estimer que ce couple introduit dans le calcul une imprécision

plus faible que celle qu'introduirait l'utilisation des mesures brutes ; nous l'estimons à environ 1/100 en valeur relative.

Sur ces données, un calcul d'erreur permet d'arriver au résultat schématique suivant :

$$k > 10^{-4}\ m/s \longrightarrow \Delta k/k \sim 20\ \%$$
$$k < 10^{-4}\ m/s \longrightarrow \Delta k/k \sim 10\ \%$$

42. ERREUR SYSTÉMATIQUE

La détermination du coefficient de perméabilité d'une roche par la méthode Lefranc et l'exploitation des résultats des mesures par les formules (22, *f*) et (22, *g*) implique un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

Ainsi, indépendamment de toute autre cause, la valeur du coefficient fournie par un essai est une valeur approchée.

Les hypothèses nécessaires à la définition de la méthode sont :

— terrains homogènes à l'échelle de l'essai ;
— nappe horizontale, de grande étendue et d'épaisseur importante ;
— dimensions de la lanterne faibles par rapport à celles de la nappe ;
— écoulement ne perturbant pas la nappe de façon sensible.

Ces hypothèses sont formulées dans toutes les études d'hydraulique souterraine.

L'imprécision qui résulte de leur adoption est celle qui sépare la théorie de la réalité en cette matière. Son appréciation sort donc tout à fait du cadre de notre étude.

Les hypothèses nécessaires au calcul du coefficient de perméabilité par les formules (22, *f*) et (22, *g*) sont :

— lanterne de forme géométrique simple ;
— analogie formelle entre certaines formules de l'hydraulique souterraine et de l'électrostatique.

Nous discuterons, plus loin, les conséquences de la première hypothèse.

Schneebeli a étudié, au moyen d'essais sur modèle électrique, l'approximation qui résulte de l'utilisation de ces

formules pour calculer le coefficient de perméabilité. Nous citons cet auteur commentant les résultats qu'il a obtenus :

« ... L'examen de ces résultats montre que, jusqu'à $H/\Phi \leqq 10$, la formule (22, *f*) de la sphère donne une approximation excellente — l'écart avec les valeurs vraies est nettement inférieur à 10 % —. La formule (22, *g*) du cylindre doit, en principe, donner une bonne approximation pour les grandes valeurs de H/Φ. On voit, cependant, qu'elle est encore satisfaisante pour $H/\Phi \geqq 1$... »

43. IMPRÉCISION RÉSULTANT DE LA FORME DE LA LANTERNE

La théorie de Lefranc est valable quelle que soit la forme de la lanterne mais l'utilisation des formules (22, *f*) et (22, *g*) implique qu'elle soit géométriquement simple (sphère ou cylindre).

Il est bien évident que, sauf dans certains cas (lanterne haute créée à rotation), il en est rarement ainsi.

Il est à peu près impossible d'apprécier avec certitude l'imprécision qui résulte de ce fait. Néanmoins, nous pensons qu'elle n'est pas considérable.

Nous avons souvent constaté, en effet, qu'une modification de la lanterne en cours d'essai (ensablement ou éboulement) ne changeait pratiquement pas la valeur du coefficient de perméabilité calculé d'après les mesures prises avant et après l'accident (voir, à ce sujet, le paragraphe 653).

44. IMPRÉCISION RÉSULTANT DE PHÉNOMÈNES PARASITES

De nombreux phénomènes parasites peuvent se manifester au cours d'un essai.

Il est tout à fait impossible de les déceler si l'on ne procède qu'à une seule mesure débit-charge. Par contre, l'étude de la courbe caractéristique de l'essai permet d'en mettre un certain nombre en évidence.

441. Phénomènes parasites décelables

Au dépouillement, certains phénomènes parasites se manifestent par la non-linéarité partielle ou totale de la courbe caractéristique de l'essai.

Nous verrons, dans le chapitre 6, que la forme de celle-ci permet de reconnaître le phénomène qui est la cause de son irrégularité.

Le calcul du coefficient de perméabilité ne pose, dès lors, plus aucun problème et la précision sur sa valeur n'est pas altérée.

442. Phénomènes parasites indécelables

Certains phénomènes parasites ne peuvent, en aucun cas, être décelés ; ce sont ceux qui n'influent en rien la linéarité des écoulements.

Il est néanmoins possible, dans certains cas, de soupçonner leur existence ; par exemple, quand on connaît déjà la perméabilité moyenne de la roche et que la valeur obtenue par un essai est tout à fait aberrante.

Bien que, par leur nature même, ils soient difficiles à caractériser, nous allons en signaler quelques-uns :

— Colmatage de la surface de perméabilité.
— Altération des qualités du terrain lors de la préparation de la lanterne.
— Présence de gros galets sur les parois de la surface filtrante.
— Cheminements privilégiés.

On peut essayer d'éviter ces accidents en accordant le plus grand soin à l'exécution des opérations de mesures.

Il n'est donc pas toujours possible de garantir la parfaite réalisation d'un essai isolé.

Le meilleur moyen de pallier cet inconvénient est l'exécution d'un assez grand nombre d'essais au cours d'une même campagne ; on peut ainsi exploiter statistiquement l'ensemble de ses résultats.

Indiquons que la proportion moyenne d'essais donnant des résultats aberrants au cours d'une même campagne est d'environ 1 %.

45. CONCLUSIONS

Certains pensent que les causes incontrôlables d'imprécisions sont telles qu'il n'est pas nécessaire de procéder à des mesures très précises pour déterminer le coefficient de perméabilité d'une roche par la méthode Lefranc. Ils sont ainsi conduits à n'exprimer les valeurs de ce coefficient qu'en puissances de 10.

A notre avis, si l'essai a été exécuté et dépouillé avec beaucoup de soins, la prise des mesures et l'ensemble des autres causes d'imprécision conduisent à des erreurs dont les valeurs sont du même ordre de grandeur.

L'erreur relative sur la valeur calculée du coefficient de perméabilité n'est donc jamais supérieure à 25 %. Cela est très largement suffisant puisque les perméabilités déterminables par la méthode LEFRANC s'étalent de 10^{-1} à 10^{-8} m/s.

46. COMPARAISON DE RÉSULTATS OBTENUS PAR LA MÉTHODE LEFRANC ET PAR CELLE DE POMPAGE DANS UN PUITS

La méthode la plus classique pour déterminer *in situ* le coefficient de perméabilité d'une roche consiste à pomper ou à injecter à débit constant de l'eau dans un puits et à observer, grâce à des piézomètres répartis autour de celui-ci, l'évolution de la nappe durant l'opération.

Il nous a paru intéressant de comparer les valeurs du coefficient de perméabilité obtenues successivement, dans la même zone d'un massif rocheux, par cette méthode et par celle des essais de perméabilité.

Nous avons étudié, dans ce but, les résultats de quatre campagnes au cours desquelles des sondages ont tout d'abord été exécutés, qui ont permis de caractériser la roche aquifère et la nappe dans la zone d'essai ; en particulier, de très nombreux essais de perméabilité y ont été réalisés.

Le puits et les piézomètres d'observation ont ensuite été foncés puis équipés. L'essai de pompage a enfin été exécuté et ses résultats, exploités au moyen des formules de DUPUIT ou de THEIS.

Nous avons ainsi pu faire les remarques suivantes :

— les valeurs moyennes du coefficient de perméabilité, obtenues par l'une et par l'autre méthode sont tout à fait comparables ; leur rapport ne dépasse jamais 2 et les essais ponctuels en ont toujours fourni les plus grandes ;

— dans une roche « homogène », les valeurs extrêmes du coefficient de perméabilité obtenues par essais ponctuels n'ont jamais atteint 50 % de la valeur moyenne obtenue de la même façon. Les essais de pompage fournissent des valeurs moins dispersées (20 % environ).

Les résultats d'une campagne d'essais de perméabilité

correctement conduite sont donc tout à fait comparables à ceux d'un essai de pompage.

Il ne nous semble donc pas justifié de subordonner ceux-là à ceux-ci comme on le fait encore souvent.

En fait, les deux méthodes se complètent utilement en fournissant des résultats de significations différentes.

Les essais de perméabilité conduisent à la détermination du coefficient de perméabilité dans des zones restreintes de la roche (54). Réalisés en grand nombre, leur ensemble permet de connaître la répartition des zones de perméabilité dans le massif rocheux que l'on peut ainsi analyser hydrogéologiquement.

Les essais de pompages, intéressant des volumes de roches assez grands, permettent d'en caractériser la perméabilité moyenne. On en réalise ainsi la synthèse hydrogéologique.

L'utilisation de l'une ou l'autre de ces deux méthodes peut donc être décidée en fonction des résultats recherchés et des moyens dont on dispose.

La précision des résultats fournis par chacune d'elles est comparable. Il est donc tout à fait inutile de contrôler une campagne d'essais ponctuels bien conduite par un essai de pompage.

5 - COMPARAISON DES DIVERS TYPES D'ESSAIS – RAYON D'ACTION D'UN ESSAI

On connaît la façon de choisir les variables d'un essai (341).

Nous nous sommes posé la question de l'équivalence des résultats obtenus en fonction de ce choix. Nous avons donc étudié de nombreux essais, au cours desquels ont été successivement utilisés divers procédés de mesures.

Nous avons, d'autre part, essayé de définir le rayon d'action d'un essai.

51. ESSAIS RÉALISÉS A NIVEAUX CONSTANTS ET A NIVEAU VARIABLE

Au cours de chacun des essais que nous avons étudié, on a exécuté, au moyen de la même lanterne, des mesures à niveaux constants, puis des mesures à niveau variable. On procédait toujours par charge ou par décharge de la nappe.

Afin de pouvoir effectuer les deux types de mesures dans de bonnes conditions, les lanternes utilisées devaient permettre des débits assez forts pour obtenir des niveaux constants stables, et assez faibles pour donner le temps de mesurer des niveaux variables (soit environ 5 l/mn).

Les résultats de ces mesures ont toujours été parfaitement homogènes.

En effet, en construisant la courbe caractéristique de l'essai au moyen de l'ensemble des points issus des deux procédés, nous avons toujours obtenu une droite moyenne unique. La dispersion des points par rapport à celle-ci est faible et, de ce point de vue, rien ne les distingue les uns des autres (fig. 51).

Ainsi, les essais réalisés à niveaux constants et ceux réalisés à niveau variable conduisent à des résultats tout à fait identiques.

Il n'y a donc aucune raison théorique valable de préférer un procédé d'exécution à l'autre.

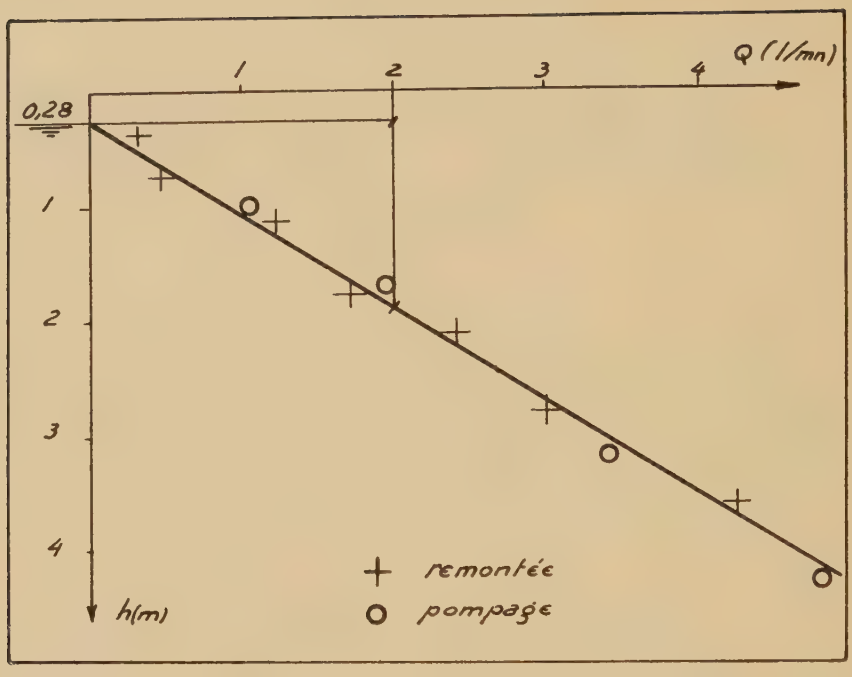


FIG. 51. — Essai à niveaux constants et à niveau variable.

52. ESSAIS EXÉCUTÉS PAR CHARGE ET PAR DÉCHARGE DE LA NAPPE

Il est quelquefois possible d'exécuter, au moyen d'une même lanterne, un essai par charge (injection ou abaissement) et un essai par décharge (pompage ou remontée) de la nappe.

Nous avons comparé les résultats de nombreux essais réalisés dans ces conditions.

Afin d'en faciliter l'interprétation, les essais étaient tous deux réalisés soit à niveaux constants (pompage puis injection), soit à niveau variable (abaissement puis remontée).

Nous avons constaté que les deux essais fournissaient des valeurs un peu différentes du coefficient de perméabilité ; la plus grande d'entre elles était toujours obtenue au moyen de l'essai par charge de la nappe ; le rapport des deux valeurs était toujours voisin de 1,2 (fig. 52).

Ainsi, la valeur du coefficient de perméabilité obtenue par charge de la nappe est toujours environ 20 % plus faible que celle obtenue par décharge.

Etant donné la précision des résultats d'un essai, on peut, en pratique, ne pas tenir compte de ce fait ; il est pourtant utile d'en connaître l'existence.

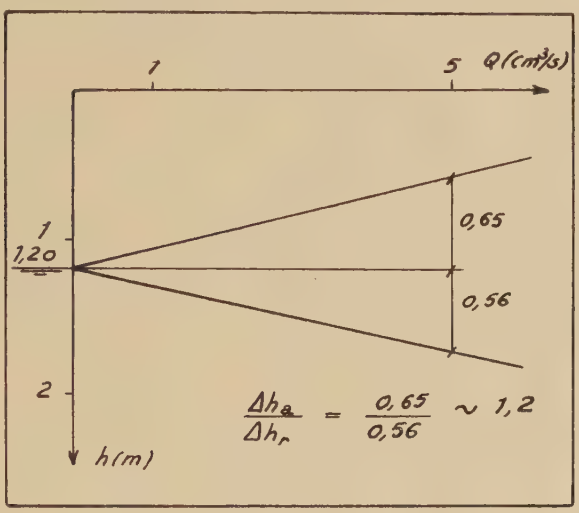


FIG. 52

Essai par charge et décharge de la nappe

53. ESSAI RÉALISÉ AU MOYEN D'UNE LANTERNE DE GRANDES DIMENSIONS

La majorité des essais de perméabilité est réalisée au moyen de lanternes de faibles dimensions ($\Phi = 100$ mm, $H = 3$ m au maximum). Aucune raison théorique n'impose ce choix.

Nous avons pu contrôler, grâce à l'étude du pompage dans un puits de 680 mm de diamètre et de 3 m de hauteur filtrante (fig. 53, 2), qu'une lanterne de grandes dimensions permettait d'obtenir des résultats tout à fait analogues à ceux fournis par une lanterne classique.

Un sondage exécuté avant le fonçage du puits, dans l'axe de celui-ci, avait permis de déterminer la perméabilité moyenne de la roche par des essais sur des petites lanternes ($\Phi = 100$ mm, $H < 50$ mm). La perméabilité déterminée à partir des résultats du pompage dans le puits fut trouvée égale à celle-ci (fig. 53, 1).

A condition de ne mettre en jeu que de faibles charges et débits afin de pas trop perturber la nappe, on peut réaliser des essais de perméabilité tout à fait valables au cours de sondages de grand diamètre.

Ainsi, le diamètre d'un sondage dans lequel on doit exécuter des essais de perméabilité peut être quelconque ; seules des considérations techniques et économiques concernant le sondage lui-même doivent être retenues pour le choisir.

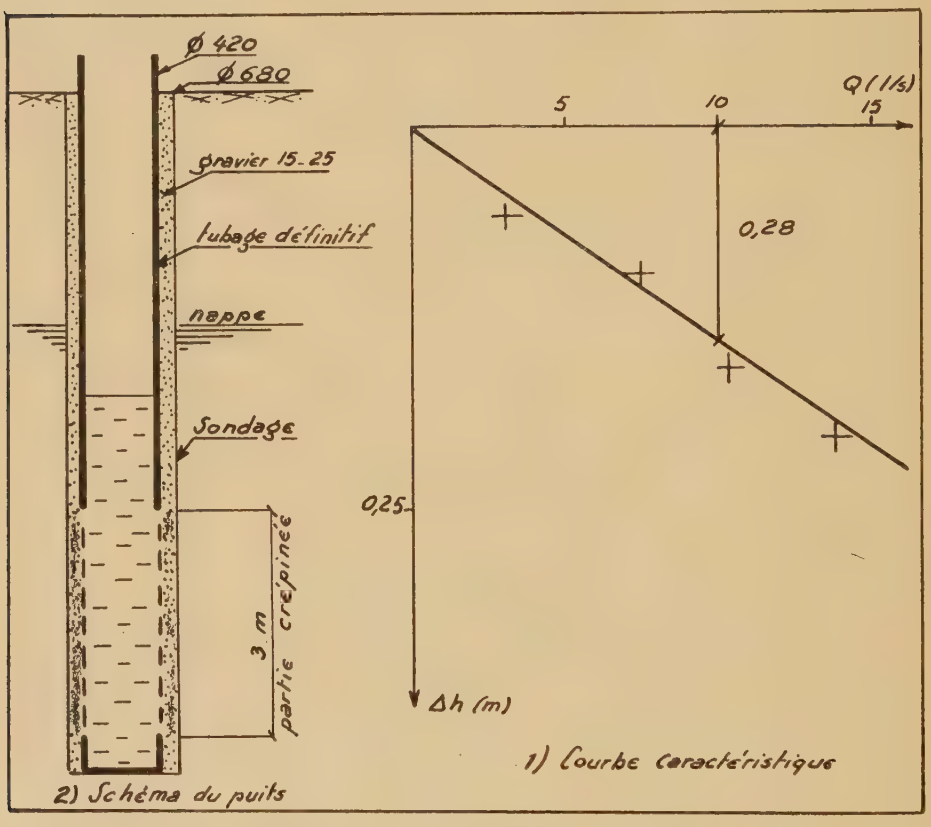


FIG. 53. — Essai réalisé sur une lanterne de grandes dimensions.

54. RAYON D'ACTION D'UN ESSAI

On peut définir le rayon d'action d'un essai comme la distance, à l'axe de la lanterne, des points de la nappe où celle-ci n'est plus perturbée de façon sensible par l'essai.

SCHNEEBELI a établi, au moyen de mesures à la cuve électrique, des graphiques indiquant, pour quelques types de lanternes, les distances auxquelles la différence de charge prend des valeurs supérieures à 10 % de la valeur de la différence

de charge sur la lanterne (fig. 54). Il estime que les points de la nappe extérieurs à la surface des « valeurs 10 % » n'ont pratiquement pas d'influence sur le déroulement de l'essai.

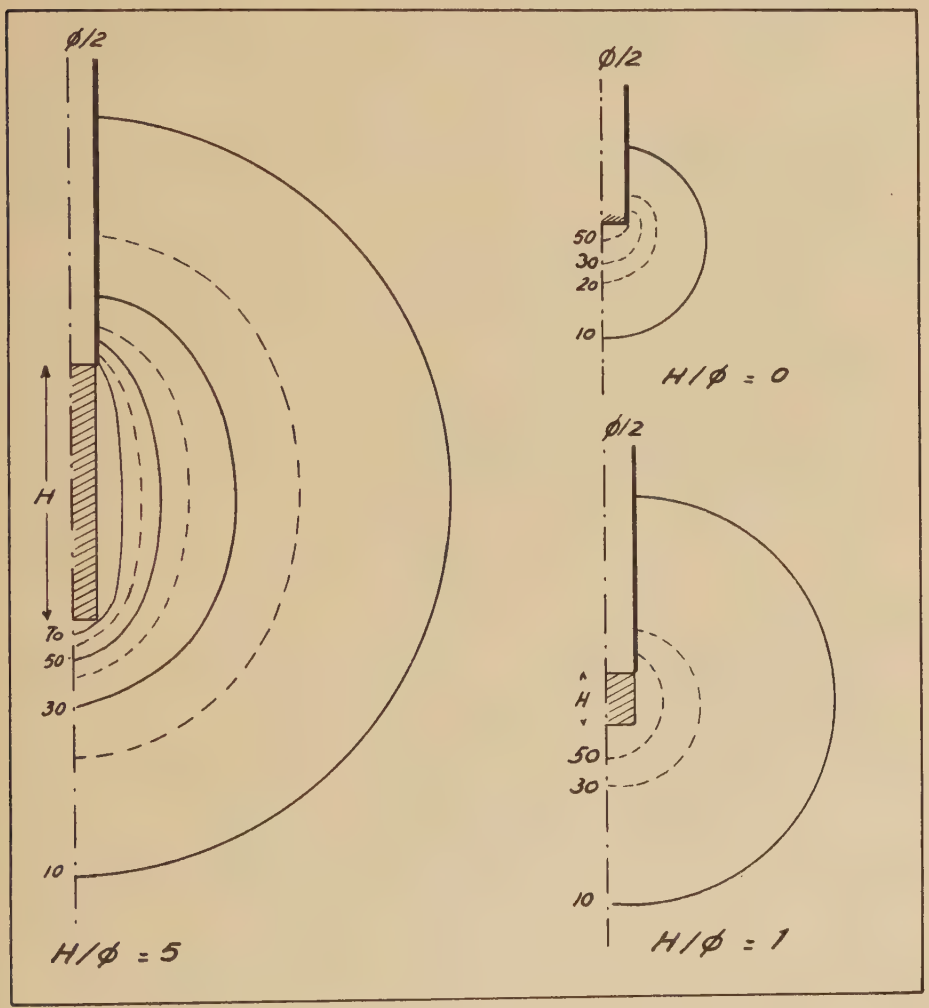


Fig. 54. — Rayon d'action d'un essai (Schneebeli).
Pourcentage de perte de charge en fonction de la distance à la lanterne.

Nous allons calculer le rayon d'action R d'un essai effectué sur une lanterne sphérique de rayon r :

La formule (22, *a*) de LEFRANC permet d'écrire le débit :

— de la lanterne :

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot k \cdot r \cdot \Delta h$$

— de la sphère de rayon R :

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot k \cdot R \cdot \Delta h'$$

et ainsi : $R = r \cdot \Delta h' / \Delta h$ (54, *a*)

En admettant que le rayon d'action est celui défini par SCHNEEBELI, on a :

$$R = 10 \cdot r \qquad (54, b)$$

ce qui correspond bien au graphique de cet auteur.

Un essai a permis de contrôler qu'il en était bien ainsi.

A 2 m du sondage dans lequel fut exécuté celui-ci, on avait placé un tube piézométrique dont la partie crépinée était à la même profondeur que la lanterne. Celle-ci avait pour rayon r = 0,05 m. Pour un certain débit, la charge mesurée dans le sondage atteignait 0,15 m et 0,003 m dans le piézomètre ; ce qui correspond à un rayon d'action théorique :

$$R = 0{,}05 \cdot \frac{0{,}15}{0{,}003} = 2{,}5 \text{ m}$$

Etant donné la faible précision que l'on doit attendre de cette expérience sommaire, on peut considérer son résultat comme concluant.

Ainsi, le rayon d'action d'un essai de perméabilité est très faible ; il excède rarement 3 à 4 m.

Cette méthode de détermination du coefficient de perméabilité d'une roche est donc particulièrement bien adaptée à l'analyse hydrogéologique d'un massif rocheux.

6. - ÉTUDE DE QUELQUES PHÉNOMÈNES PARASITES

Un essai de perméabilité est quelquefois perturbé par l'apparition, au cours des mesures, de phénomènes parasites qui en entachent la précision.

L'étude de la courbe caractéristique d'un tel essai permet, en général, de reconnaître le phénomène et, malgré celui-ci, de calculer le coefficient de perméabilité de la roche.

61. STABILITÉ DU NIVEAU D'EAU PENDANT UN ESSAI A NIVEAUX CONSTANTS

La stabilité du niveau d'eau pendant le pompage ou l'injection à débits constants est nécessaire à l'interprétation correcte des résultats de l'essai.

Cette stabilisation est parfois difficile à obtenir pour des raisons techniques ou naturelles.

La difficulté peut parfois provenir d'un fonctionnement irrégulier de la pompe. On a toujours intérêt, pour l'éviter, à utiliser un appareil surpuissant capable de débits nettement plus élevés que ceux mis en jeu.

La stabilité naturelle du débit et celle du niveau d'eau s'obtiennent, en général, avant une dizaine de minutes de pompage ; c'est la raison pour laquelle on demande toujours à l'opérateur de procéder à dix mesures par débit calé. Il est parfois utile de poursuivre un peu cette opération mais comme il est impossible de le faire trop longtemps, on risque de ne pas obtenir une stabilisation satisfaisante.

Si le niveau oscille autour d'une position moyenne, on peut la prendre comme valeur utile. Si celui-ci monte ou descend de façon continue durant le pompage (le débit mis en jeu est, dans ce cas, trop fort ou trop faible pour les possibilités de la lanterne), on peut exploiter les mesures comme celles d'un essai mixte. Si les variations sont désordonnées, il est bon de ne pas utiliser la série de mesures leur correspondant.

62. RÉGIME D'ÉCOULEMENT CHARGE LIMITE DE TURBULENCE

Il est essentiel de connaître le régime de l'écoulement réalisé lors d'un essai car, seules, les mesures prises quand il est laminaire permettent de calculer le coefficient de perméabilité.

En général, quand la vitesse d'un écoulement est faible, son régime est laminaire, mais quand elle croît et dépasse une certaine limite, il devient turbulent.

La vitesse limite qui correspond au changement de régime est fonction d'un certain nombre de facteurs qui caractérisent le fluide et le conduit dans lequel il s'écoule.

La vitesse de l'écoulement n'étant pas mesurable au cours d'un essai ponctuel, on définit dans ce cas une charge (ou un gradient) limite au delà de laquelle l'écoulement réalisé n'est plus laminaire. Cette charge limite peut être calculée ou déterminée expérimentalement.

Le calcul permet d'atteindre la valeur théorique de la charge limite ; il utilise des formules empiriques et impose de nombreuses simplifications. On ne peut donc la retenir que comme ordre de grandeur approximatif.

La détermination expérimentale en fournit une valeur précise. On réalise automatiquement cette opération en construisant la courbe caractéristique d'un essai.

621. Calcul de la charge limite correspondant au seuil de la turbulence

6211. Formule du gradient de Sichard.

Sichard a donné une formule empirique permettant de calculer le gradient limite d'un écoulement dû au pompage dans un puits ; celle-ci s'écrit, en exprimant k en m/s :

$$i = \frac{1}{15.\sqrt{k}} \qquad (6211, a)$$

On peut, dans le cas d'un essai ponctuel, prendre pour valeur de i le rapport $\Delta h/r$ où Δh est la charge limite et r le rayon du sondage. La charge limite a ainsi pour valeur :

$$\Delta h = \frac{r}{15.\sqrt{k}} \qquad (6211, b)$$

6212. Nombre de Reynolds.

On sait que le régime d'un écoulement est fonction de la vitesse de celui-ci. Il est laminaire quand la vitesse est inférieure à une certaine limite V_0 et turbulent quand elle lui est supérieure. La vitesse limite V_0 s'exprime par la formule :

$$V_0 = \frac{R_e}{d} \cdot \frac{\eta}{\rho} \qquad (6212, a)$$

où d est le diamètre du conduit d'écoulement, η la viscosité du fluide, ϱ sa masse spécifique et R_e un nombre, appelé nombre de Reynolds, dont la valeur est fonction des conditions d'écoulement.

Dans le cas d'un terrain poreux aquifère, on peut identifier V_0 à la vitesse d'écoulement, d au diamètre maximum des grains les plus fins dont l'ensemble constitue 10 % du poids total du matériau (d_{10}) ; on peut aussi prendre $\eta/\varrho = 1/100$ C.G.S. pour caractériser l'eau qui s'écoule dans le terrain. On a ainsi :

$$V_0 = \frac{R_e}{100 \cdot d_{10}}$$

et, en utilisant la formule de Hazen simplifiée : $k = 100\ d^2_{10}$ (C.G.S.) :

$$V_0 = \frac{R_e}{10 \cdot \sqrt{k}} \qquad (6212, b)$$

Une lanterne de hauteur H et diamètre Φ a pour surface

$$S = \pi \cdot \phi^2 \cdot (H/\phi + 1/4) \cdot$$

et pour débit $Q = V \cdot S = \dfrac{\pi \cdot \phi^2 \cdot R_e \cdot (H/\phi + 1/4)}{10 \cdot \sqrt{k}}$

Or, d'après la formule (22, *f*),

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \Delta h \cdot \phi \cdot \sqrt{H/\phi + 1/4}$$

La charge limite Δh a donc pour valeur :

$$\Delta h = \frac{R_e \cdot \phi \cdot \sqrt{H/\phi + 1/4}}{20 \cdot k \cdot \sqrt{k}} \qquad (6212, c)$$

Certains auteurs attribuent à R_e la valeur 1. On a ainsi :

$$\Delta h = \frac{\phi \cdot \sqrt{H/\phi + 1/4}}{20 \cdot k \cdot \sqrt{k}} \quad (CGS) \qquad (6212, d)$$

Nous verrons plus loin que les charges limites calculées à l'aide des formules précédentes sont à peu près analogues à celles que l'on observe effectivement lors d'un essai perturbé. Mais nous verrons aussi que dans la plupart des essais, la charge peut atteindre des valeurs nettement plus élevées que celles de la charge calculée sans que l'écoulement soit perturbé.

On ne peut donc pas utiliser ces formules pour calculer à priori la valeur effective de la charge limite.

622. **Détermination expérimentale de la charge limite**

La détermination expérimentale permet d'atteindre la valeur réelle de la charge limite et ainsi de séparer, de façon certaine, les mesures prises quand l'écoulement est laminaire, seules acceptables pour calculer le coefficient de perméabilité, de celles prises quand l'écoulement est turbulent, qui doivent être rejetées.

L'écoulement laminaire correspond à une relation linéaire de la charge et du débit tandis que, lors d'un écoulement turbulent, la charge est sensiblement proportionnelle au carré du débit. La courbe caractéristique d'un essai en partie perturbé par le phénomène de turbulence n'est donc pas une droite mais une courbe composée d'une partie droite qui correspond à l'écoulement laminaire et d'une partie à peu près parabolique, tangente à la droite, qui correspond à l'écoulement turbulent. Le point de contact de ces deux parties définit le seuil de turbulence. Celui-ci permet de trouver rapidement la valeur de la charge limite qui lui correspond (fig. 622).

Pour calculer le coefficient de perméabilité, on doit, bien entendu, utiliser les coordonnées d'un point pris sur la partie droite de la courbe caractéristique.

De nombreux essais, parmi ceux que nous avons étudiés, ont été plus ou moins perturbés par un écoulement turbulent ; mais il est très facile à un opérateur averti d'éviter cette perturbation, en limitant volontairement la charge maximum utilisée.

De ce point de vue, l'étude statistique d'un ensemble d'essais est donc peu justifiée. Disons simplement qu'environ 10 % d'entre eux ont été perturbés et qu'à de très rares exceptions près, tous ceux-ci ont été réalisés à niveaux constants.

Par contre, plus intéressantes seront nos remarques concernant la détermination du nombre de Reynolds ou de la charge limite théorique calculée par la formule du gradient de Sichard.

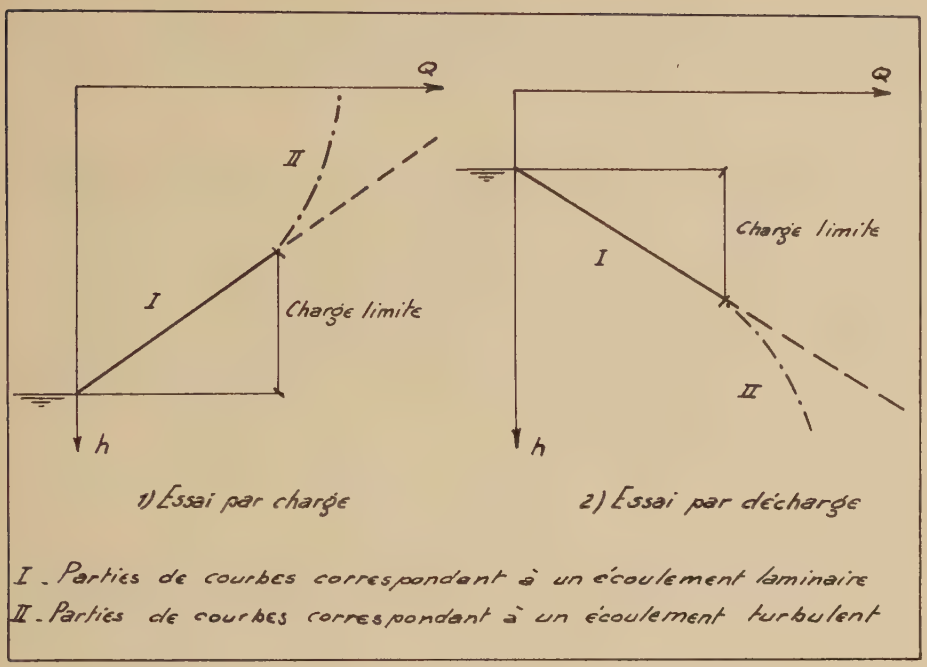


FIG. 622. — Détermination expérimentale de la charge limite correspondant au seuil de turbulence.

Les valeurs du nombre de REYNOLDS que nous avons obtenues en utilisant la formule (6212, *c*) sont toutes inférieures à 200 et la majorité d'entre elles sont comprises entre 1 et 4. Ce sont là, en gros, les valeurs qu'indiquent divers auteurs qui ont calculé ce nombre par des méthodes différentes de la nôtre.

Les valeurs de la charge limite calculée au moyen de la formule (6211, *b*) et celles qui ont été déterminées expérimentalement sont du même ordre de grandeur. Leur rapport dépasse rarement 3 et varie le plus souvent entre 1 et 2. Nous avons constaté qu'en général, la valeur calculée de la charge limite était supérieure à la valeur déterminée expérimentalement mais que cette règle souffrait de nombreuses exceptions et que, bien souvent, la charge effectivement utilisée pouvait être très nettement supérieure à la charge limite calculée sans que l'apparition de phénomènes de turbulence se manifeste.

En général, si le sondage a été utilisé pour la réalisation de plusieurs essais dans le même terrain, on constate que la plupart du temps, ceux-ci sont tous perturbés ou bien qu'aucun d'entre eux ne l'est.

On peut penser que la nature de la roche intervient dans l'apparition du phénomène et la favorise plus ou moins.

Il est donc utile d'indiquer, parmi les résultats de l'essai, la charge limite correspondant au seuil de turbulence.

63. CRÉATION DE RENARDS DANS LES TERRAINS MEUBLES

Les essais à niveaux constants et, plus particulièrement ceux de pompages, sont quelquefois altérés par une désorganisation totale de la roche aux alentours de la lanterne. Aux forts débits, les parties fines du terrain sont localement mises en suspension et entraînées par l'eau. Il se produit ainsi des cheminements privilégiés (renards) par lesquels circule toute l'eau mise en mouvement.

Quand le phénomène se produit, on constate souvent que l'eau pompée devient trouble et, à la fin de l'essai, que la lanterne est en partie comblée par du sable.

L'écoulement de l'eau à travers le terrain désorganisé provoque des pertes de charge beaucoup plus faibles qu'à travers le terrain intact ; les charges croissent donc moins vite que les débits. Il arrive quelquefois que l'on puisse saisir le moment exact où se déclanche le phénomène ; on constate alors une brusque variation du niveau de l'eau dans le sondage alors que le débit reste sensiblement constant.

La courbe caractéristique de l'essai présente, en général, une partie rectiligne correspondant aux faibles débits, sur laquelle on mesure les valeurs de la charge et du débit servant au calcul du coefficient de perméabilité, et une partie aberrante, courbe ou droite, qui représente l'écoulement après la création du renard (fig. 63). Le point commun aux deux parties de la courbe est dit « seuil de renard ».

On peut caractériser le seuil de renard par la charge Δh à laquelle se produit le phénomène, ou par le gradient $\Delta h/r$ que l'on appelle, dans ce cas, « gradient de boulance ».

Le gradient de boulance d'un terrain en place est une caractéristique importante qu'il est quelquefois intéressant de déterminer. On peut donc être conduit à provoquer un renard en pompant à fort débit à la fin de l'essai. On ne parvient pas toujours à déclencher le phénomène car, en agissant ainsi, on risque de rendre l'écoulement turbulent.

Nous avons constaté que les terrains les plus affectés par ce phénomène avaient une perméabilité voisine de 10^{-3} m/s.

Les décharges importantes, nécessaires dans ces terrains au pompage de forts débits, favorisent l'entraînement des fines.

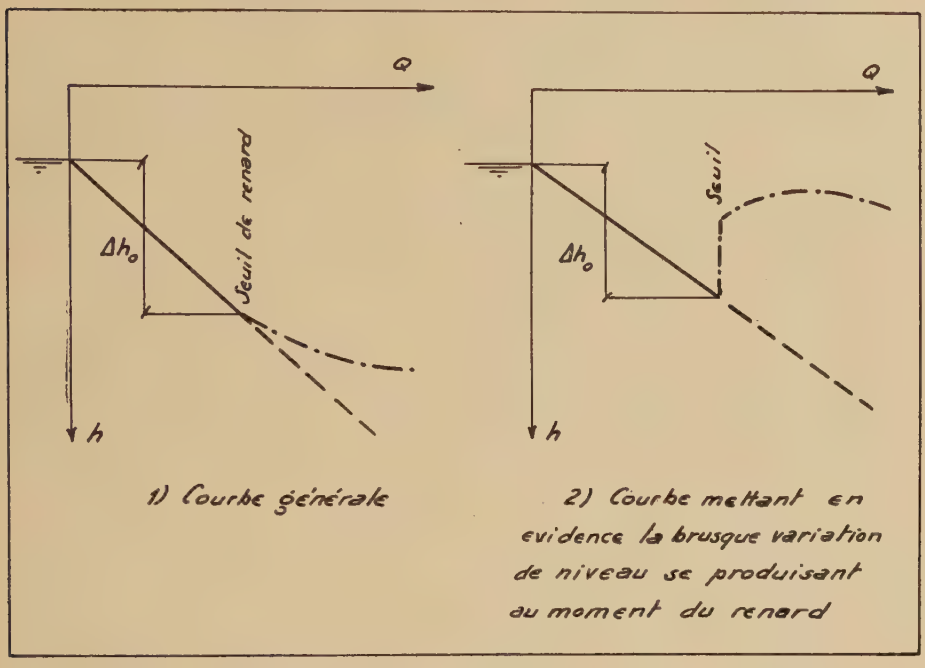


FIG. 63. — Courbes caractéristiques d'essais affectés par des renards.

64. VARIATIONS DU NIVEAU DE BASE DE L'ESSAI

Il arrive parfois que la profondeur du niveau de base de l'essai varie de façon sensible au cours des opérations de mesures. La courbe caractéristique est alors aberrante et il est nécessaire de l'étudier de près pour pouvoir calculer le coefficient de perméabilité.

Ce phénomène peut avoir plusieurs causes.

La première qui vient à l'esprit est la variation naturelle du niveau de la nappe au cours de l'essai. Nous n'avons pas à étudier ici cet accident en tant que phénomène hydrogéologique ; nous n'en discuterons que les conséquences pratiques.

On peut aussi envisager une mise en charge artificielle de l'eau aux environs immédiats de la lanterne. Ceci serait dû à l'injection de volumes d'eau importants dans des terrains peu perméables où la circulation de l'eau est très lente. Inversement,

un fort pompage dans des terrains analogues peut créer une décharge sensible au cours de l'essai. L'équilibre normal de la nappe n'est alors atteint qu'au bout d'un temps trop long pour être pratiquement observable.

Afin de faciliter l'interprétation des essais affectés par l'un de ces phénomènes, il faut toujours mesurer le niveau de l'eau quand la nappe est au repos, avant et après l'essai.

641. Variation du niveau de la nappe

Une variation du niveau de la nappe est tout à fait indépendante du déroulement de l'essai. Elle peut se produire dans un sens ou dans l'autre. Elle est en général lente et continue et, comme la durée d'un essai est toujours faible par rapport à la sienne, elle n'est sensible que dans un terrain assez perméable. Si l'on dispose d'un piézomètre installé à proximité du sondage d'essai, il doit montrer une variation de niveau analogue à celle que l'on constate durant les mesures.

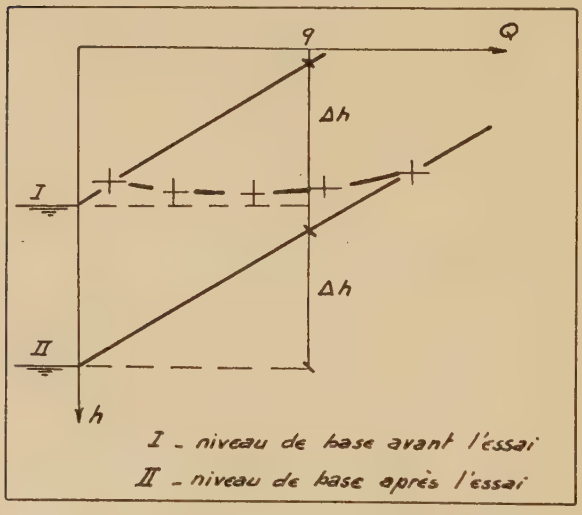


FIG. 64

Variation continue du niveau de base de l'essai

On reconnaît, en général, ce phénomène aux caractères suivants :

— faible variation du niveau de base,
— terrains perméables ($k \backsim 10^{-3}$ m/s),
— courbe caractéristique de l'essai continue.

Il est bien entendu impossible d'apporter un remède quelconque à un tel phénomène et seule une étude attentive de la

courbe caractéristique permet d'exploiter les résultats d'un essai qu'il entache.

Chaque point de la courbe correspond à une position intermédiaire du niveau de la nappe entre celles repérées au début et à la fin de l'essai et, en particulier, les points extrêmes leur correspondent sensiblement.

On peut tracer les deux droites joignant respectivement chacun de ces points aux points de débit nul qui leur correspondent. Si ces deux droites sont sensiblement parallèles (fig. 64), leur pente commune permet d'obtenir les éléments de calcul (q et Δh) du coefficient de perméabilité.

642. Variation artificielle du niveau de base

La variation du niveau piézométrique dans le sondage peut être provoquée par l'apport ou le retrait d'eau nécessaire à la réalisation d'un essai à niveaux constants.

Elle peut alors être lente ou brusque mais se produit toujours dans un sens déterminé par la nature de l'essai : montée au cours d'un essai d'injection et descente au cours d'un essai de pompage.

La perméabilité des terrains dans lesquels elle se produit est, en général, faible et il est souvent très difficile de stabiliser les débits et les niveaux durant les mesures.

Si l'on injecte de l'eau dans une roche peu perméable, on risque d'apporter dans la zone environnant la lanterne plus d'eau qu'il peut s'en répandre rapidement dans la nappe. Le régime d'écoulement n'est que grossièrement permanent ; il est, en fait, la superposition d'un écoulement à débit constant et d'un autre à niveau variable. La zone est, durant l'essai, constamment surchargée par rapport aux conditions normales ; la lenteur du retour aux conditions initiales fait apparaître, en fin d'essai, un niveau piézométrique anormalement élevé. Un essai par pompage provoque dans les mêmes conditions des phénomènes inverses.

On peut observer deux types de variations :

Les faibles débits du début de l'essai peuvent être normalement absorbés par le terrain et c'est seulement quand le débit devient important que le phénomène se manifeste. Les débits supérieurs à ce débit critique peuvent ensuite être normalement absorbés, faisant apparaître une perméabilité de la roche plus ou moins différente de celle qui correspond au début de l'essai.

Ce phénomène peut, dans certains cas, être favorisé par une structure lenticulaire de la roche.

La courbe caractéristique de l'essai est composée de deux droites reliées par une partie sensiblement verticale marquant la discontinuité de l'écoulement (fig. 642). La perméabilité de la roche est facile à déduire de la pente de la droite qui correspond aux faibles débits.

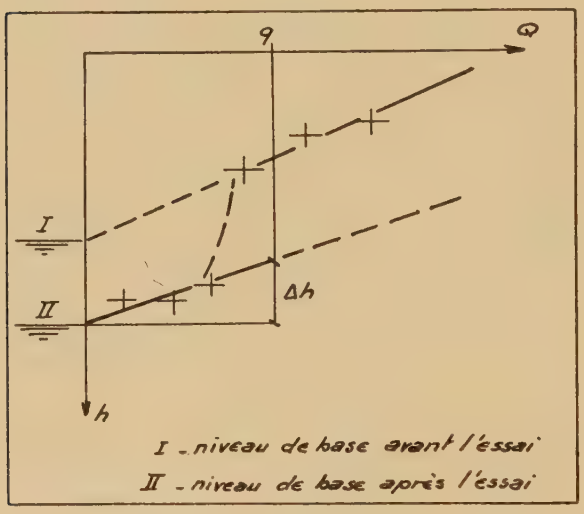


FIG. 642

Variation brusque du niveau de base de l'essai

La variation peut être continue si les faibles débits eux-mêmes ne sont pas facilement absorbés par la roche. La courbe caractéristique est alors analogue à celle obtenue lors d'une variation de la nappe durant l'essai (fig. 64). La lecture peut donc en être faite de la même façon.

Il est toujours délicat d'interpréter la courbe caractéristique d'un essai entaché par ce phénomène. On a donc intérêt à en éviter la manifestation.

Pour cela, les débits d'eau injectée ou pompée doivent être aussi faibles que possible. Dans les terrains perméables ($k > 10^{-4}$ m/s), les essais à niveaux constants sont possibles sans que le phénomène se manifeste. On veillera malgré tout à ce que ceux-ci soient réalisés rapidement. Dans les terrains peu perméables ($k < 10^{-4}$ m/s), il est préférable de ne réaliser que des essais à niveaux variables, ne mettant en jeu que de faibles débits ; nous avons d'ailleurs donné d'autres raisons d'agir de la sorte.

65 ACCIDENTS SURVENANT A LA LANTERNE

Parmi les nombreux accidents qui peuvent survenir à la lanterne au cours d'un essai, trois sont assez fréquents et méritent une étude particulière ; il s'agit du colmatage et du décolmatage des parois ainsi que de l'ensablement partiel de la lanterne.

651. Colmatage de la surface de perméabilité

Le colmatage des parois de la lanterne est un accident qui affecte quelquefois les essais par injection ou par abaissement.

Si l'eau utilisée pour de tels essais est trouble, il peut arriver que les pores du terrain soient plus ou moins obstrués par le dépôt des particules en suspension. La perméabilité apparente de la roche est ainsi plus faible à la fin de l'essai qu'au début de celui-ci.

La courbe caractéristique de l'essai est alors une courbe concave vers le haut dont la pente de la tangente croît d'abord avec les débits pour devenir constante en fin d'essai (fig. 651). La tangente à cette courbe au point de débit nul correspond à peu près à la droite que l'on aurait obtenue si l'essai avait été normal. C'est donc elle qui fournit les éléments de calcul du coefficient de perméabilité (Δh_0 et q).

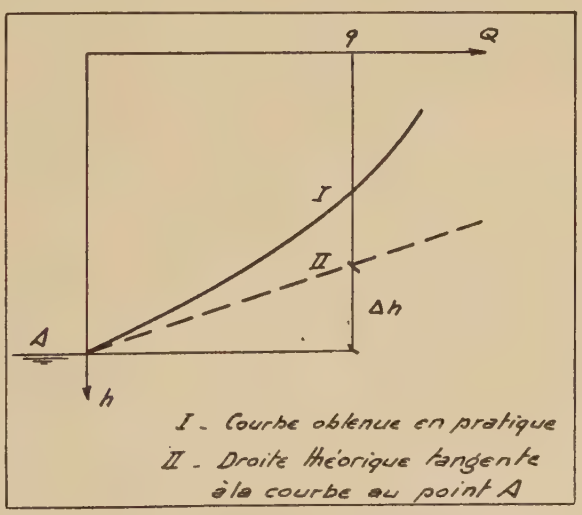


FIG. 651
Colmatage de la surface de perméabilité

Nous avons pu souvent contrôler qu'il en était bien ainsi en comparant des valeurs du coefficient de perméabilité ainsi obtenues avec celles qu'avaient fournies des essais régulièrement réalisés avant ceux affectés par l'accident.

Nous avons déjà insisté sur l'importance de la clarté de l'eau utilisée pour les essais par injection ou abaissement. Il est toujours préférable d'utiliser une eau très claire, même apportée de loin, plutôt qu'une eau trouble prise à proximité du chantier ; l'interprétation des résultats d'essais irréguliers est, en effet, délicate et sujette à caution.

652. **Décolmatage de la surface de perméabilité**

Il arrive quelquefois que la surface de la lanterne ait été plus ou moins colmatée pendant le travail de préparation au trépan à injection d'eau.

Si le colmatage est tenace, il n'y a aucun moyen de le mettre en évidence et le coefficient de perméabilité obtenu dans ces conditions est erroné.

Mais, au cours de l'essai, la lanterne peut se décolmater. Cela peut se produire instantanément ou progressivement et, en particulier, lors d'essais de pompage quand les débits deviennent importants ; on peut aussi provoquer le décolmatage en ébranlant les terrains autour de la lanterne par un coup de trépan ou bien en frappant sèchement le tubage.

La courbe caractéristique de l'essai est, en général, composée de deux droites de pente différente. Celle qui correspond aux faibles débits a une pente plus forte que celle qui correspond aux forts débits. Ces deux droites sont reliées par une courbe qui correspond au décolmatage (fig. 652).

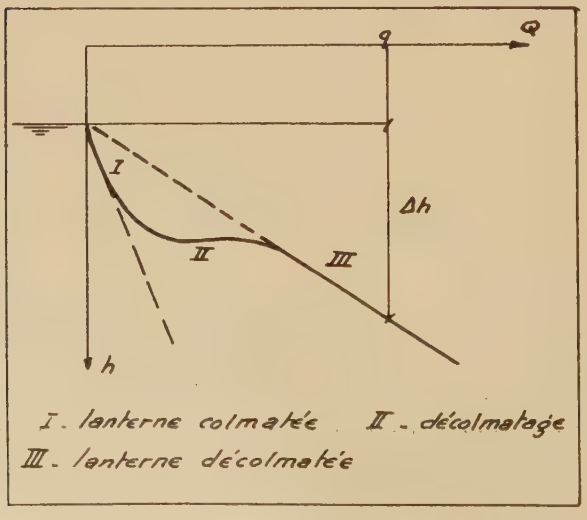


FIG. 652

Décolmatage de la surface de perméabilité

C'est, bien entendu, la deuxième droite qui fournit les éléments du calcul du coefficient de perméabilité.

Cet « accident » est, en fait, favorable à l'exécution de l'essai. Il est bon, quand on utilise une eau trouble pour travailler au trépan, d'essayer de le provoquer en réalisant l'essai par pompage et en frappant le tubage au début de la première mesure.

653. **Ensablement partiel de la lanterne**

Dans les roches meubles très sableuses, on constate parfois, à la fin de l'essai, que la lanterne a été plus ou moins envahie par du sable ; cela se produit, en particulier, lors d'essais par pompages.

La hauteur de la lanterne varie donc au cours de l'essai et, ainsi, le phénomène peut être décelé en sondant le fond de la lanterne avant et après l'essai. C'est la raison pour laquelle on impose toujours l'exécution de cette double opération.

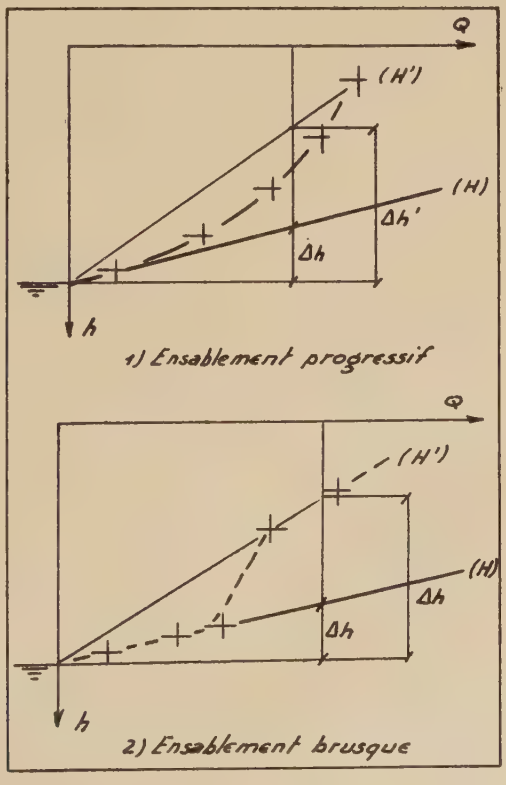


FIG. 653

Ensablement partiel de la lanterne

L'ensablement peut être progressif ou brusque. Quand l'ensablement est progressif, la courbe caractéristique de l'essai est continue. Chacun de ses points correspond à la hauteur de la lanterne au moment de la mesure qui a servi à le définir (fig. 653, 1).

Ainsi, en joignant un point de la courbe au point de débit nul, on obtient la droite caractéristique d'un essai exécuté sur la lanterne de hauteur correspondant à ce point. On ignore celle-ci mais on connaît celles du début et de la fin de l'essai.

On calcule donc le coefficient de perméabilité avec les éléments fournis par chacune de ces droites (H, Δh et q ou H', $\Delta h'$ et q).

Les deux valeurs ainsi obtenues doivent être à peu près identiques.

Si l'ensablement est brusque, la courbe est constituée de deux droites sécantes au point de débit nul (fig. 653, 2). Chacune d'entre elles peut fournir les éléments de calcul du coefficient de perméabilité (H, Δh et q ou H', $\Delta h'$ et q). Là encore, les deux valeurs ainsi obtenues doivent être à peu près identiques.

7. - APPLICATIONS PARTICULIÈRES DE LA MÉTHODE LEFRANC

Les essais de perméabilité permettent, entre autres, de déterminer la perméabilité d'une roche en couche mince, d'une roche non aquifère et d'une roche fissurée ; on peut aussi les utiliser au calcul des perméabilités verticale et horizontale d'un terrain anisotrope.

De telles déterminations sont longues et difficiles, ou même tout à fait impossibles, au moyen de la méthode classique de pompage dans un puits.

C'est dire toute l'importance pratique de ce dernier chapitre de notre étude.

71. DÉTERMINATION SUR LANTERNE HAUTE DU COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ D'UNE ROCHE EN COUCHE MINCE

Quand un sondage à rotation non tubé traverse une couche mince de roche, il est rare qu'un essai sélectif puisse y être exécuté. On peut, tout de même, en calculer le coefficient de perméabilité en réalisant deux essais.

Le premier essai utilise une lanterne de hauteur H creusée à la fois dans la couche mince A et dans la couche B (fig. 71,1). Il fournit la valeur k d'un coefficient de perméabilité dans lequel interviennent les deux couches.

Le deuxième essai utilise une lanterne entièrement creusée dans la couche B (fig. 71, 2). Il permet de calculer son coefficient de perméabilité k_B.

Si a et b sont les hauteurs des couches A et B intéressées par la lanterne du premier essai, on peut écrire en appelant k_A le coefficient de perméabilité de la couche A

$$kH = k_A \cdot a + k_B \cdot b$$

et ainsi :

$$k_A = \frac{k.H - k_B.b}{a} \qquad (71)$$

Il est donc facile de calculer le coefficient de perméabilité d'une roche en couche mince.

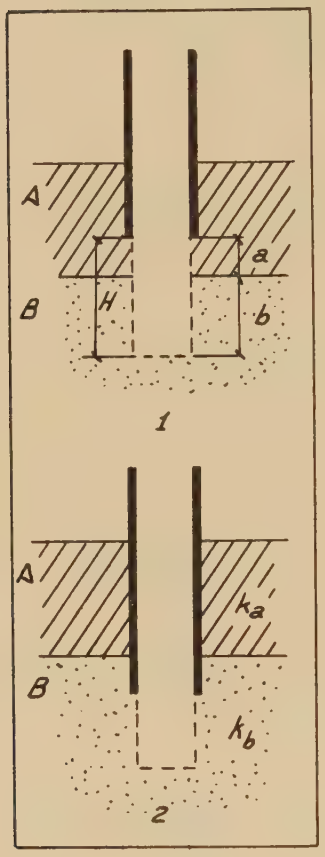


FIG. 71

Détermination du coefficient de perméabilité d'une roche en couche mince

On peut, de façon similaire, calculer les coefficients de perméabilité de n couches au moyen de (n + 1) essais. Ceci est particulièrement intéressant, lors d'un sondage à rotation traversant des couches différentes, puisque l'on peut ainsi éviter l'emploi d'obturateurs pour isoler successivement chacune d'elles.

72. DÉTERMINATION DU COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ DES ROCHES NON AQUIFÈRES

Il est intéressant, pour conduire certaines études d'hydraulique souterraine comme, par exemple, la dérivation de cours

d'eau en plaine alluviale ou l'alimentation artificielle de nappes phréatiques, de connaître la perméabilité de terrains non aquifères.

Seuls les essais de perméabilité permettent d'effectuer, *in situ*, cette détermination.

Le principe de la méthode Lefranc étant la mesure du débit d'une source ponctuelle en fonction de la charge ou de la décharge d'une nappe, il semble *a priori* qu'elle ne soit pas adaptée à l'étude d'un terrain sec. En fait, un essai d'injection d'eau (par injection ou abaissement) sur une lanterne creusée dans un tel terrain peut être interprété de la même façon que si la lanterne était creusée dans un terrain aquifère.

Cette interprétation est toujours délicate et il est bon que l'ingénieur qui en est chargé suive, sur le chantier, les opérations de mesures.

721. **Principe de la méthode**

Le principe de cette méthode est analogue à celui de la méthode générale mais, comme le terrain ne contient pas de nappe, on ne peut pas étudier les débits de la lanterne en fonction de la charge ou de la décharge de celle-ci.

L'expérience montre pourtant que, si l'on injecte de l'eau dans un terrain sec, un niveau qui varie avec le débit s'établit dans le tube.

On peut ainsi étudier les variations de débit ΔQ en fonction des variations de niveaux Δh. La loi de variation s'exprime par une formule analogue à la formule (21). On a :

$$\Delta Q = k \cdot \Delta h \cdot f \qquad (721)$$

Les formules (22, *f*) et (22, *g*) peuvent donc être utilisées en y remplaçant Q par ΔQ.

722. **Préparation de la lanterne**

La création d'une lanterne en terrain sec est analogue à celle d'une lanterne en terrain aquifère mais des précautions particulières doivent être prises pendant cette opération.

Il est toujours préférable d'utiliser le trépan à injection d'eau claire plutôt que le carottier à percussion.

En effet, nous verrons plus loin que, pour la bonne marche de l'essai, la zone de terrain entourant la lanterne doit être saturée en eau. Dans ce but, on doit injecter une quantité d'eau

plus ou moins grande avant de commencer les mesures ; l'usage du trépan permet donc de commencer cette opération pendant la préparation et le lavage de la lanterne.

De plus, un terrain meuble a un angle de frottement interne beaucoup plus grand quand il est sec que quand il est saturé d'eau. On risque, dans ces conditions, de creuser, avec le carottier, une lanterne assez haute qui tient parfaitement tant que le terrain est sec, mais qui s'éboule au cours des mesures quand il est saturé.

723. **Pratique de la méthode**

La pratique des essais en terrains secs ne diffère pas de celle des essais normaux ; bien entendu, on est limité à l'injection pour les essais à niveaux constants et à l'abaissement pour ceux à niveau variable ; le choix entre ces deux procédés obéit aux mêmes règles que pour les essais en terrains aquifères.

Avant de procéder aux mesures, on doit saturer le terrain. Cette opération est absolument nécessaire et c'est de sa bonne exécution que dépend la qualité des résultats obtenus.

Les eaux contenues dans une roche saturée peuvent être classées en deux catégories :

— les eaux fixées aux parois des pores de la roche par adsorption ou par attraction capillaire. Ces eaux ne peuvent pas circuler dans la roche sous l'action d'une différence de charge ;

— l'eau « gravifique » qui remplit les pores de la roche. Elle est susceptible de s'écouler sous l'action d'une différence de charge.

Le rapport de la quantité d'eau fixée à la quantité d'eau gravifique contenue dans une roche dépend de la finesse de ses pores : plus les pores sont fins, plus ce rapport est grand.

Si une roche sèche est mise en contact avec de l'eau, elle tend d'abord à se saturer en eau fixée. Pendant cette phase de saturation, l'eau est surtout animée par des forces d'attraction moléculaire dont l'effet est beaucoup plus intense que celui des forces de pesanteur. Les écoulements ne sont donc pas régis par la loi de Darcy.

Quand cette phase est terminée, les vides de la roche se remplissent et la circulation de l'eau ne se fait plus que sous l'action de forces de pesanteur. Les écoulements peuvent donc être régis par la loi de Darcy.

Ainsi, pour pouvoir effectuer un essai de perméabilité, il est

nécessaire que la roche soit saturée en eau afin que l'action des tensions superficielles soit négligeable devant celle des forces de pesanteur.

On ne peut évidemment pas prétendre saturer entièrement un massif de roche sèche, mais nous savons que le rayon d'action d'un essai doit toujours être faible ; on peut donc prévoir que la saturation d'un faible volume de terrain autour de la lanterne suffira à la bonne marche d'un essai.

Le contrôle de la saturation de ce volume se fait pendant le dépouillement de l'essai. L'opérateur doit, bien entendu, être capable de l'apprécier sur le chantier.

Un essai complet doit, dans la mesure du possible, être exécuté successivement par injection puis par abaissement.

724. Dépouillement d'un essai complet

L'obtention des points de la courbe caractéristique à partir des résultats des mesures ne pose aucun problème particulier. Nous nous attacherons seulement à l'étude de la courbe elle-même (fig. 724).

Les parties I, II et III de la courbe correspondent à l'injection à débits constants.

Au début de l'injection, si la roche n'est pas suffisamment saturée, les tensions superficielles sont encore prépondérantes : les charges sont faibles par rapport aux débits et la relation entre ces deux grandeurs n'est pas linéaire ; on observe souvent une baisse de niveau en même temps qu'une augmentation de débit (partie I de la courbe).

La roche se sature progressivement et bientôt la relation charge-débit devient linéaire ; l'écoulement est alors régi par la loi de Darcy (partie II de la courbe).

Quand la durée de l'essai se prolonge, et si les débits injectés deviennent élevés, on constate parfois une forte variation de niveau : la charge croît plus vite que le débit, l'écoulement est turbulent (partie III de la courbe).

Les parties IV et V de la courbe correspondent à l'abaissement.

Au début de cette phase, l'écoulement est encore régi par la loi de Darcy ; la partie de courbe correspondant à cette phase (IV) est une droite sensiblement parallèle à la droite de la partie II.

Vers la fin de l'abaissement, la variation s'accélère : le niveau décroît plus vite que le débit ; on dit quelquefois que la

nappe artificielle créée par l'injection s'effondre. Le terrain qui n'est plus alimenté se « vide » rapidement.

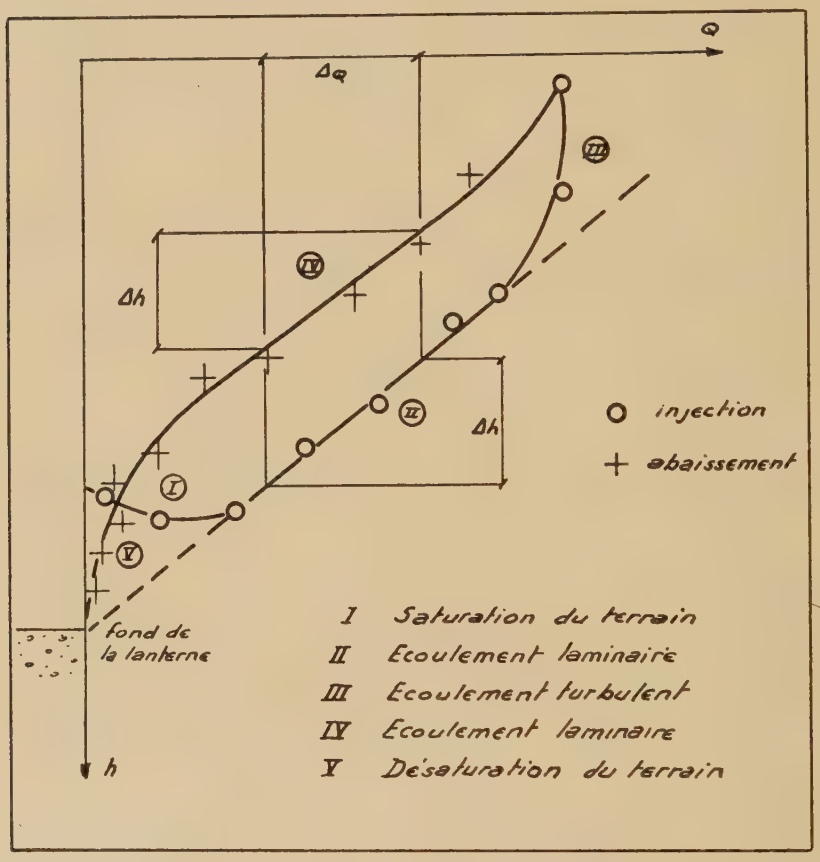


Fig. 724. — Essai de perméabilité en terrain sec.

Il est bien rare que l'on exécute en totalité un tel essai. On procède soit par injection, soit par abaissement.

Dans le premier cas, on obtient une courbe composée, au plus, des parties I, II, III ; dans le deuxième, des parties IV et V.

Seules, les parties II et IV de la courbe peuvent être utilisées pour définir les éléments du calcul du coefficient de perméabilité.

725. **Validité des essais - Conclusions**

Nous nous sommes posés la question de la validité des résultats d'un essai exécuté en terrain sec.

Nous pouvons, tout d'abord, remarquer que le fait d'obtenir des courbes ou des parties de courbes rectilignes montre qu'à un certain moment, l'écoulement est régi par la loi de DARCY et ainsi, *a priori*, l'essai est valable.

Nous avons aussi comparé les résultats d'essais réalisés dans une même roche au-dessus et dans la nappe. Les valeurs obtenues différaient rarement de plus de 10 %, ce qui est très acceptable.

Sous réserve d'exécution soignée et d'interprétation judicieuse, cette méthode est parfaitement adaptée à la détermination du coefficient de perméabilité d'une roche sèche.

C'est pourquoi nous pensons qu'il est tout à fait inutile d'essayer, dans ce but, des méthodes dont la mise en œuvre est compliquée, l'interprétation délicate et dont, de toute façon, les résultats sont incertains comme, par exemple, celle des essais par pompage ou injection d'air que l'on préfère parfois à celle que nous avons décrite.

73. DÉTERMINATION DE LA PERMÉABILITÉ ÉQUIVALENTE D'UNE ROCHE FISSURÉE

On ne peut définir la perméabilité d'une roche que si les écoulements qui sont susceptibles de s'y produire sont régis par la loi de DARCY. Or, dans les roches fissurées, les vides ont, en général, des dimensions telles qu'il n'en est que rarement ainsi. D'autre part, la répartition des fissures est loin d'être régulière et il est difficile de considérer une telle roche comme homogène.

Néanmoins, pour de grands volumes de roches et de faibles vitesses d'écoulement, on peut définir une perméabilité équivalente de la roche : elle est égale à la perméabilité d'une roche poreuse homogène qui, toutes choses égales d'ailleurs, permet le même débit par unité de surface sous l'action de la même différence de charge.

Sauf dans le cas des roches karstiques que nous ne considérons pas ici, les fissures sont peu nombreuses et très fines ; les circulations d'eau y sont, le plus souvent, très limitées.

Pour étudier leurs qualités hydrauliques, on y réalise des essais d'eau sous pression que l'on appelle, du nom de leur promoteur, essais LUGEON : une tranche de sondage est isolée au moyen d'un ou deux obturateurs et l'on y injecte de l'eau sous pression ; on étudie les variations du débit en fonction de la pression d'injection.

On exprime les résultats de ces essais en litres d'eau absorbés par minute et par mètre de sondage sous la pression de 10 kg/cm². L'unité est appelée « le lugeon ».

Afin de simplifier la notation quantitative des qualités hydrauliques des roches et de permettre les comparaisons entre roches différentes, nous pensons qu'il est utile d'exprimer (chaque fois qu'il est possible de le faire) les résultats d'essais LUGEON en m/s. Cela est très facile :

supposons que l'on réalise un essai LUGEON sur une tranche de H m de sondage dont le diamètre est Φ m. Le débit absorbé est de Q l/mn sous la pression p kg/cm². On peut, en remplaçant la pression par son équivalent en mètres d'eau (en gros, p × 10), écrire la perméabilité équivalente de la roche. On a :

$$K = \frac{Q \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 2 \cdot \pi \cdot H \cdot (10 \cdot p)} \cdot \log \frac{2 \cdot H}{\Phi} \qquad (73)$$

Si $H/\Phi > 2$, ce qui est le cas général pour de tels essais.

Comme pour les essais LEFRANC, on mesure plusieurs groupes débits-pressions et on trace la courbe caractéristique de l'essai. Celle-ci est très rarement une droite mais sa partie moyenne est, en général, à peu près linéaire (fig. 73, 2) ; c'est elle qui permet de définir les éléments du calcul.

Il est très souvent possible d'exécuter, sur une même tranche de sondage, un essai LUGEON et un essai LEFRANC. Pour cela, le sondage doit être autant que possible vertical et comporter, au départ, une partie tubée ou étanche. Nous avons pu comparer les résultats ainsi obtenus sur de nombreux exemples (fig. 73). Ils sont tout à fait analogues.

Ainsi, on peut, dans certains cas, remplacer un essai sous pression par un essai de perméabilité, toujours plus facile à préparer et à exécuter.

Il ne faut jamais perdre de vue la signification de la perméabilité équivalente d'une roche fissurée ainsi déterminée.

Celle-ci rend compte des qualités hydrauliques globales de la portion de roche étudiée.

Elle peut varier de façon considérable avec la hauteur et la position de la lanterne utilisée. On obtient, par exemple, une forte perméabilité équivalente avec une petite lanterne creusée dans une zone très fissurée et alors que celle-ci peut être très faible si la même lanterne est creusée dans une zone peu fissurée.

Cette notion ne peut donc être retenue que pour caractériser les résultats d'essais réalisés sur de grandes lanternes (H de plusieurs mètres) qui ont le maximum de chances de recouper des zones dont la fissuration est très variable. Un grand nombre d'essais est, bien entendu, nécessaire pour caractériser de façon correcte les qualités hydrauliques moyennes d'un massif de roches fissurées.

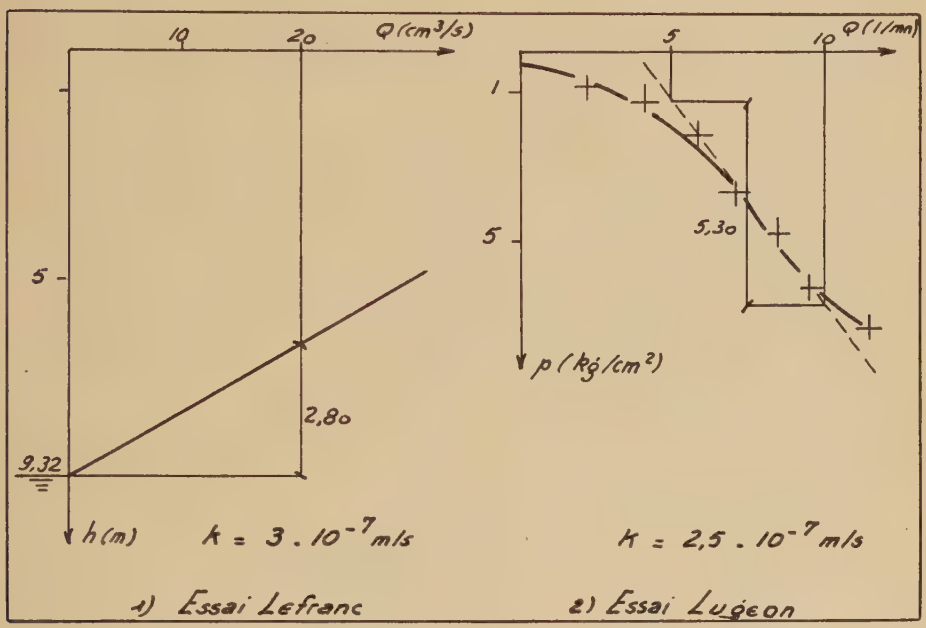


FIG. 73. — Détermination de la perméabilité équivalente d'une roche fissurée.

74. DÉTERMINATION DES PERMÉABILITÉS HORIZONTALE ET VERTICALE D'UNE ROCHE

La détermination des perméabilités horizontale et verticale d'une roche est, entre autres, nécessaire à l'étude de la protection des fouilles à l'aide d'écrans étanches (palplanches, pieux sécants, alluvions injectés) dont la base n'atteint pas une roche imperméable.

En assimilant la roche à un milieu homogène et anisotrope, on peut déterminer ces perméabilités en utilisant une méthode par essais LEFRANC, dont SCHNEEBELI a exposé la théorie.

Nous allons rappeler celle-ci puis nous en dégagerons les principes d'une application pratique.

Si la roche est hétérogène (formée par exemple de couches de perméabilités différentes), cette méthode ne peut pas être appliquée. La détermination des perméabilités verticale et horizontale d'une telle roche est néanmoins possible ; nous verrons rapidement un moyen d'y parvenir.

741. **Détermination dans les roches homogènes**

7411. Formules de Schneebeli.

Schneebeli admet que, dans une roche homogène et anisotrope, il existe deux directions de perméabilités principales, k_v, perméabilité verticale, et k_H, perméabilité horizontale.

Il montre alors que les formules établies dans le cas de terrains homogènes peuvent s'écrire :

$H/\Phi = 0$ (fond) $$\frac{\Delta h . \phi . \sqrt{k_H . k_v}}{Q} = \frac{1}{\pi} \qquad (7411, a)$$

$H/\Phi \leqq 2$ (lanterne basse)

$$\frac{\Delta h . \phi . \sqrt{k_H . k_v}}{Q} = \frac{1}{2 . \pi . \sqrt{\frac{H . \sqrt{k_H / k_v}}{\phi} + \frac{1}{4}}} \qquad (7411, b)$$

L'essai effectué sur le fond du tube permet donc de calculer la moyenne géométrique $\sqrt{k_H . k_v}$ des perméabilités principales de la roche.

La formule (7411, *b*) peut s'écrire :

$$\frac{Q}{\Delta h} = 2 . \pi . \phi . \sqrt{k_H . k_v} \sqrt{\frac{H . \sqrt{k_H / k_v}}{\phi} + \frac{1}{4}}$$

ou, en posant

$$y = Q/\Delta h \,, \quad a = H/\phi \quad \text{et} \quad \alpha = \sqrt{k_H / k_v}$$

$$y = 2 . \pi . \phi . \sqrt{k_H . k_v} \, . \sqrt{a . \alpha + 1/4}$$

En réalisant deux essais sur des lanternes de hauteurs différentes ($H_1 < H_2$ et $H_1 \geqq 0$) on obtient :

$$Y_{(1-2)} = \frac{y_1}{y_2} = \sqrt{\frac{a_1 . \alpha + 1/4}{a_2 . \alpha + 1/4}} \qquad (7411, c)$$

ce qui permet de calculer le rapport des perméabilités principales de la roche.

On peut remarquer que, quand α qui est un nombre positif, varie de 0 à $+\infty$, Y varie de 1 à $\sqrt{H_1/H_2}$ soit, avec notre convention, $H_1 < H_2$:

$$\sqrt{H_1/H_2} < Y < 1$$

7412. Principe de la méthode.

On réalise deux essais, le premier sur le fond du tube et l'autre sur une lanterne de hauteur $H = \Phi$.

L'essai sur le fond permet le calcul de $\sqrt{k_H . k_V}$

La combinaison des deux essais permet de calculer $Y_{(0-1)}$. On a :

$$Y_{(0-1)} = \frac{Q/\Delta h_0}{Q/\Delta h_1} = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_0}$$

On reporte la valeur trouvée dans la formule (7411, *c*) et l'on calcule $\alpha = \sqrt{k_H/k_V}$

Connaissant $\sqrt{k_H . k_V}$ et $\sqrt{k_H/k_V}$ on calcule facilement k_H et k_V qui sont, bien entendu, des grandeurs positives.

7413. Abaques pour déterminer le rapport k_H/k_V.

Le calcul de k_H/k_V est long si l'on utilise la formule (7411, *c*). Un abaque calculé par Ruby permet de déterminer rapidement ce rapport.

En général, a est fixé par la valeur H que l'on choisit pour l'essai et Y se calcule facilement à partir des valeurs de Q et Δh mesurées au cours de celui-ci. On veut connaître α.

L'abaque le plus logique doit donc donner :

$$\alpha^2 = \varphi \left[Y_{(a_1 - a_2)} \right]$$

ou, ce qui revient au même :

$$\frac{\Delta h_{a2}}{\Delta h_{a1}} = \varphi\left(\frac{k_H}{k_V}\right)$$

La figure 7413 représente les abaques calculés pour des lanternes telles que $H/\Phi = 0$, 1/2, 1 et 2, que l'on utilise couramment.

7414. Pratique de la méthode.

74141. *Déroulement des opérations.*

Comme pour les essais courants, les sondages ($\Phi = 114$) sont exécutés à percussion dans les terrains meubles ; le tubage est toujours battu à l'avancement. Quand le sabot a atteint la profondeur de l'essai, on cure le tubage au moyen du trépan à injection ; la longueur du train de tige de trépan est soigneusement mesurée de façon à pouvoir arrêter l'extrémité de l'outil à la même profondeur que le sabot.

Cette opération de curage doit être conduite avec beaucoup de soins, si l'on veut réaliser convenablement une surface de perméabilité constituée par le fond du sondage ($H/\Phi = 0$).

On procède, sur cette surface, à l'essai (*a*), puis quand la roche est meuble, on jette dans le sondage environ deux litres de graviers (15-25). Par contre-battage, on remonte ensuite le tubage de 5 cm ; on crée ainsi une lanterne dont le $H/\Phi = 0{,}5$ et l'on effectue l'essai (*b*). On monte à nouveau le tubage de 5 ou 15 cm pour obtenir une lanterne dont le $H/\Phi = 1$ ou 2 sur laquelle on effectue l'essai (*c*) ; nous justifierons, plus loin, la nécessité de ce troisième essai, théoriquement inutile.

L'opération de remontée du tubage, que nous avons déconseillé pour les essais normaux est, dans ce cas, indispensable. Il est, en effet, rarement possible de forer dans les roches meubles plus de 5 cm sous le sabot sans provoquer d'éboulement. Le gravier jeté dans le sondage maintient les parois de la lanterne ; sa mise en œuvre rend nécessaire cette opération.

Si la roche est cohérente, on peut préparer les lanternes successives à l'avancement sans toucher au tubage ; cette méthode est toujours préférable à la précédente.

74142. *Les essais.*

On doit nécessairement effectuer l'essai sur le fond du tube par abaissement ou injection afin d'éviter les remontées de sable

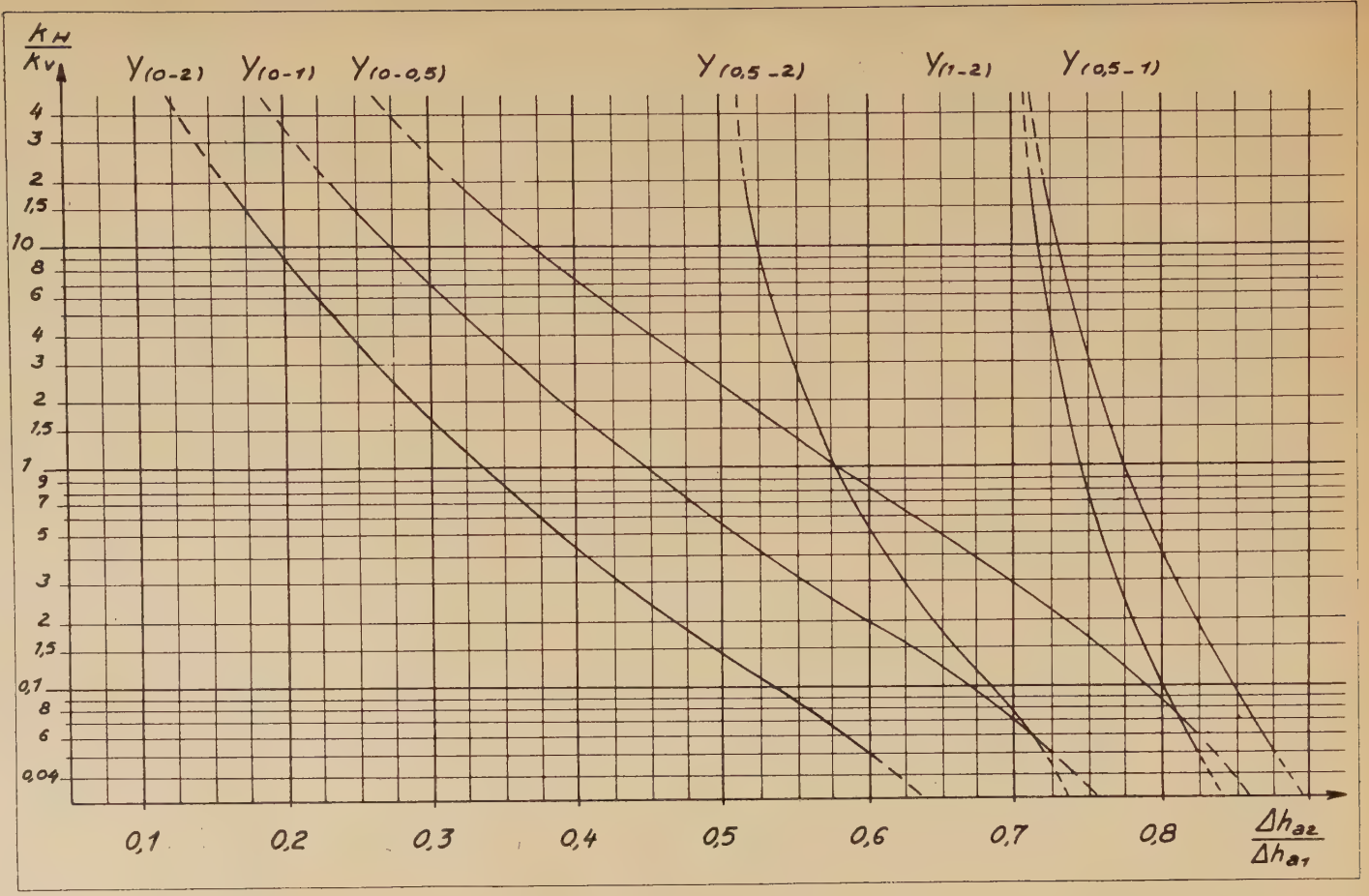


FIG. 7413. — Abaques pour la détermination du rapport k_H / k_V

dans le tubage, ce qui se produirait inévitablement au cours d'un pompage ou même d'une remontée.

Afin d'obtenir des résultats comparables aux siens, les deux autres devront être conduits de la même façon.

74143. *Incidents techniques.*

La surface de perméabilité constituée par le fond du tube peut être pratiquement imperméable, ce qui rend impossible la détermination de $\sqrt{k_H . k_V}$. Ce phénomène doit être dû au tassement de la roche pendant le travail de l'outil. L'utilisation du trépan à injection qui permet, dans une certaine mesure, de nettoyer la surface de perméabilité, est donc préférable à celle du carottier à percussion.

Malgré toutes les précautions que l'on prend, l'essai sur le fond du tube est toujours douteux car, même si la surface s'avère perméable, son colmatage partiel est toujours possible ; nous verrons plus loin de quelle façon on peut pallier cet inconvénient.

Si le terrain est très perméable et si l'on travaille sur une lanterne de hauteur importante, la charge sous laquelle se fait l'écoulement risque d'être trop faible pour être mesurée avec précision. Il y a donc intérêt à ne créer que des lanternes basses.

7415. Dépouillement des résultats des mesures.

Les essais sont d'abord dépouillés séparément comme les essais courants.

L'essai (*a*) sur le fond du tube fournit théoriquement la valeur de $\sqrt{k_H . k_V}$.

Les trois essais, pris deux à deux, fournissent les charges correspondant à un débit donné. On a ainsi :

$$Y_{(0-0,5)} = \frac{\Delta h_{0,5}}{\Delta h_0} \qquad Y_{(0-1)} = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_0} \qquad Y_{(0,5-1)} = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_{0,5}}$$

Celles-ci permettent, en général, d'obtenir au moyen des abaques, des valeurs du rapport k_H/k_V.

74151. *Essais inexploitables.*

On peut trouver une ou plusieurs valeurs de Y supérieures à 1 ou inférieures à $\sqrt{H_1/H_2}$ qui sont donc inutilisables.

On prend pour vraie valeur du rapport k_H/k_v, celle fournie les unes des autres ; il n'y a aucune raison d'en retenir une plutôt qu'une autre et les résultats doivent être considérés comme négatifs.

74152. *Essais exploitables.*

On peut obtenir trois valeurs de k_H/k_v égales à moins de 20 % près. L'utilisation de ces résultats ne pose donc aucun problème particulier.

D'autres essais peuvent présenter la particularité suivante :

Les valeurs de $Y_{(0—0,5)}$ et $Y_{(0—1)}$ trouvées conduisent à deux valeurs à peu près égales du rapport k_H/k_v tandis que celle de $Y_{(0,5—1)}$ conduit à une valeur de ce rapport très différente des deux autres.

Contrairement à ce que l'on peut penser, c'est cette dernière que nous considérons comme valable. En effet, les mesures prises sur les lanternes de hauteur 0,5 Φ et 1 Φ ont plus de chances d'être correctes que celles prises sur le fond du tube toujours plus ou moins colmaté. Ce colmatage entraîne la détermination incorrecte de $\sqrt{k_H . k_v}$

On peut calculer la vraie valeur de cette expression grâce aux résultats des deux autres essais :

On prend pour vraie valeur du rapport k_H/k_v celle fournie par $Y_{(0,5—1)}$. On cherche sur l'abaque la valeur de $Y_{(0—0,5)}$ correspondant à ce rapport. Cette valeur conduit à la charge théorique sous laquelle aurait dû se faire l'écoulement au débit choisi si la surface de perméabilité n'avait pas été colmatée. On a :

$$\Delta h_o = \Delta h_{(0,5)}/Y_{(0—0,5)}$$

Il reste à calculer le nouveau coefficient de perméabilité au moyen du débit choisi et de la charge théorique ainsi calculée. Celui-ci est égal à $\sqrt{k_H . k_v}$

7416. Conclusions.

Nous ne reviendrons pas sur les groupes d'essais entachés par des incidents techniques ni sur ceux qui sont utilisables.

Nous dirons quelques mots sur les groupes d'essais fournissant des résultats inexploitables.

Il s'agit des groupes qui conduisent à trois valeurs incohérentes de k_H/k_V ou bien à des valeurs de Y inférieures à $\sqrt{H_1/H_2}$ ou supérieures à 1.

Les trois valeurs du coefficient de perméabilité calculé par les résultats de chaque essai sont alors très différentes les unes des autres.

Nous pensons, dans ce cas, que l'hétérogénéité de la roche est telle qu'une ou plusieurs lanternes étaient creusées dans des couches différentes. Il est facile de comprendre que, dans ce cas, l'écoulement de l'eau se fait surtout à travers les parties de la surface de perméabilité correspondant aux zones les plus perméables, ce qui fausse tout à fait les mesures.

Il est donc recommandé de n'utiliser que des lanternes de faible hauteur. Nous avons obtenu de bons résultats avec les groupes

$$H/\Phi = 0,\ 0{,}5 \text{ et } 1 \qquad \text{et } H/\Phi = 0,\ 0{,}5 \text{ et } 2.$$

Si la roche est très hétérogène, la méthode de SCHNEEBELI ne peut pas être utilisée.

742. Détermination des perméabilités principales d'une roche hétérogène

L'existence de deux directions principales de perméabilité dans un massif rocheux est plus souvent due à son hétérogénéité qu'à son anisotropie.

Un cas fréquent d'hétérogénéité dans les alluvions est dû à leur structure en couches ou lentilles horizontales superposées.

Le sondage de reconnaissance permet de préciser la nature et l'épaisseur de ces couches. Un essai effectué dans chacune d'elles en donne le coefficient de perméabilité.

Chaque couche peut donc être caractérisée par son épaisseur z_i et sa perméabilité k_i.

Si le sondage a traversé n couches et, en admettant que celles-ci sont régulières et très étendues, on peut calculer de la façon suivante les perméabilités principales de l'ensemble de la formation :

$$k_H = \frac{\sum_1^n (z_i \cdot k_i)}{\sum_1^n (z_i)} \qquad k_V = \frac{\sum_1^n (z_i)}{\sum_1^n (z_i/k_i)} \tag{742}$$

75. DÉTERMINATION DE LA PUISSANCE D'UNE NAPPE

On appelle puissance d'une nappe le produit de son épaisseur H par le coefficient de perméabilité moyen k, de la roche qui la contient ($P = k \cdot H$).

Cette grandeur est généralement déterminée en mettant en œuvre une méthode par effets de puits à puits (DUPUIT, THEIS, etc.).

On peut aussi la calculer à partir d'une série d'essais exécutés, sur lanternes basses, au cours d'un sondage.

Comme précédemment, chaque couche constituant la roche peut être caractérisée par son épaisseur z_i et sa perméabilité k_i.

Si le sondage a traversé n couches que l'on suppose régulières et étendues, la puissance de la nappe est :

$$P = k \cdot H = \Sigma_1^n (z_i \cdot k_i) \qquad (75)$$

Cette formule permet aussi de déterminer k, coefficient de perméabilité moyen de la roche.

8. - CONCLUSIONS

Le meilleur critère de la qualité d'un essai est la linéarité de sa courbe caractéristique.

L'interprétation d'une courbe aberrante est toujours délicate et ne doit être considérée que comme un pis aller auquel il faut préférer, chaque fois que cela est possible, la reprise de l'essai défectueux ; il est donc indiqué que l'opérateur soit capable, en cours d'essai, de tracer grossièrement la courbe caractéristique afin de pouvoir apprécier la qualité de son travail.

Le choix des variables de l'essai (dimensions de la lanterne et mode d'exécution) doit être fait avec beaucoup de soins.

Les applications particulières de la méthode LEFRANC sont affaire de spécialistes.

L'ingénieur doit, autant que possible, être sur le chantier pendant les opérations de mesures afin d'en contrôler la qualité.

Il doit dépouiller les essais avec une grande prudence et rejeter tous les résultats qui lui paraissent douteux.

A condition d'être exécutés par une équipe entraînée, disposant d'un matériel en excellent état et placée sous l'étroit contrôle d'un ingénieur compétent, les essais de perméabilité fournissent de très bons résultats.

Leur précision est alors tout à fait comparable à celle des résultats d'essais par effets de puits à puits et les valeurs des coefficients de perméabilité qu'ils permettent de déterminer, peuvent être données à moins de 25 % près.

9. - DOCUMENTS CONSULTÉS

Ainsi que nous l'avons souligné dans l'introduction, il existe peu de publications traitant des essais Lefranc.

Certains traités généraux d'hydraulique souterraine leur consacrent quelques lignes, mais la plupart de ces ouvrages les ignorent complètement.
Les périodiques spécialisés publient parfois des articles à leur sujet.

M. Buisson. — Essai de Géotechnique. - I. Caractères physiques et mécaniques des sols. — Dunod, 1942.

H. Cambefort. — Forages et sondages — Eyrolles, 1955.

Gignoux et Barbier. — Géologie des barrages. — Masson, 1958.

E. Lefranc. — La théorie des poches absorbantes et son application à la détermination du coefficient de perméabilité des terrains en place et au calcul du débit des nappes d'eau. — Le Génie civil, 13 novembre 1937.

E. Lefranc. — Mesure de la perméabilité des sols. — Le Génie civil, 15 août 1948.

E. Mayer. — Les terrains perméables. — Dunod, 1954.

E. Mayer. — Précis de mécanique des sols. — Armand Colin, 1959.

E Michel. — Considérations sur la pratique des essais de perméabilité ponctuels. — B.-E. Rey, Aix 1956.

R. Muller-Feuga. — Cours d'hydraulique souterraine de l'E.N.S. de géologie. Nancy. — Non édité.

P. Ragarney. — Etudes de quelques écoulements souterrains et superficiels dans les sols assainis. — Thèse Lausanne, 1943.

G. Schneebeli. — La mesure *in situ* de la perméabilité d'un terrain. — Congrès de la Société Hydrotechnique de France, Alger, 1954.

M.-N. Terletskaia. — Détermination de la perméabilité dans les terrains secs. — Article de *Constructions hydroélectriques*, n° 2.2/1957 (en russe).

L.-J. Tison. — Cours d'hydraulique (2e partie). — Gand, 1953.

J. Tolobre. — La mécanique des roches. — Dunod, 1957.

B. Gilg et M. Gavard. — Calcul de la perméabilité par les essais d'eau dans les sondages en alluvions. — *Bulletin technique de la Suisse romande*, n° 4.2/1957.

Don Kirkam. — Méthode de chantier pour mesurer la perméabilité des sols au-dessous du niveau statique de la nappe. — *Soil Science Society of Am.*, vol. 10/P.58.68/1945 (en anglais).

Don Kirkam et R.-C. Reeve. — Anisotropie des sols et quelques méthodes de chantier pour mesurer la perméabilité. — *T.A.G.U.*, vol. 32, n° 4, pp. 582-590, 8/1951 (en anglais).